

Государственный комитет Российской Федерации по высшему образованию

Уральский государственный технический университет

**АООТ «Каменск–Уральский завод
по обработке цветных металлов»**

Л.М.Железняк В.И.Свинин В.С.Токарь Б.Е.Хайкин

Широкосортamentная прокатка профилей из медных сплавов на полунепрерывном стане

Научный редактор доцент,
кандидат технических наук Ю. В. Инатович

Екатеринбург
1995

УДК 669.2:621.778

Авторы: Л.М. Железняк, В.И. Свинин, В.С. Токарь,
Б.Е. Хайкин

Широкоассортиментная прокатка профилей из медных сплавов на полунепрерывном стане / Л.М. Железняк, В.И. Свинин, В.С. Токарь, Б.Е. Хайкин.

Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1995. 154 с.

Изложены результаты решения принципиально новой для заводов цветметобработки проблемы эксплуатации сортопрокатного полунепрерывного стана 250 в режиме гибкой производственной системы. Рассмотрен комплекс сопутствующих вопросов – от теоретических до сугубо производственных.

Библиогр. 42 назв. Табл. 15 Рис. 36

Монография рекомендована к изданию научно-техническим советом АООТ «Каменск-Уральский завод ОЦМ».

Рецензенты: кафедры «Обработка металлов давлением» и «Металловедение и обработка материалов и поверхностей» МГМА;

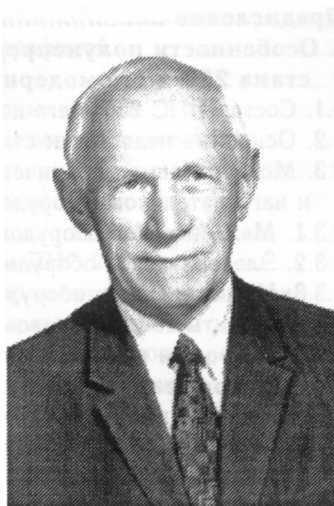
Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением» ЧГТУ.

Редакционная коллегия: Барков Л.А., Бокова Л.А., Бучнев А.П., Вайсбурд Р.А., Василевский П.А., Козловских Н.Ф., Котельников В.П., Мысик Р.К., Носенко Л.П., Плужнова З.Д., Попов Д.И., Сарапулов Ф.Н., Свободин Н.А., Скрыльников А.И., Чепланов В.И., Шеркунов В.Г., Юрьев Ю.Н.

ISBN 5-230-17187-1

© Уральский государственный
технический университет, 1995

**Светлой памяти
Анатолия Георгиевича
Стукача**



Доцент кандидат технических наук А.Г. Стукач (15.05.1914
03.07.1980)

В 1932 г. связал свою жизнь с кафедрой прокатки, преобразованной позднее в кафедру обработки металлов давлением Уральского политехнического института (ныне УГТУ - УПИ). Этапы трудовой биографии: студент, инженер, инженер-исследователь, аспирант, преподаватель, доцент. Расставался с кафедрой для службы в армии (1939-40 и 1941-46 г.г.). В Великую Отечественную безупречно прошел многолетний ратный путь от Белоруссии до Болгарии. Двадцать шесть лет подряд - руководитель специализации по обработке давлением цветных металлов и сплавов. Оказал заметное влияние на развитие кафедры и поддержание в ее коллективе духа сотрудничества.

Видный специалист в области прокатки, волочения, прессования. Замечательный человек и педагог, воспитавший множество благодарных ему учеников.

Оглавление

Предисловие	6
1. Особенности полунепрерывного мелкосортного стана 250 и его модернизация	7
1.1. Состав ПНС 250 и его достоинства	7
1.2. Основные недостатки стана и их устранение	11
1.3. Модернизация механического, электрического и нагревательного оборудования стана	19
1.3.1. Механическое оборудование	19
1.3.2. Электрическое оборудование	21
1.3.3. Нагревательное оборудование	25
1.4. Варианты совершенствования станов типа ПНС 250	27
2. Калибровки валков для прокатки широкого сортамента медных профилей	30
2.1. Принципы выбора гибких систем калибров для широкосортamentной прокатки	30
2.2. Калибровка валков обжимной клетки трио 500	39
2.3. Технологическая схема прокатки прямоугольных и клиновидных полос в непрерывных группах 350 и 300	43
2.3.1. Выбор режима прокатки клиновидного профиля	43
2.3.2. Калибровка валков для прокатки полосовых профилей	45
2.4. Калибровка валков для прокатки круглых прутков и катанки	51
3. Результаты теоретического и экспериментального исследований процесса прокатки профилей из меди и кадмиевой бронзы	53
3.1. Формоизменение при прокате заготовок прямоугольных и клиновидных профилей	53
3.2. Особенности формоизменения при асимметричной прокатке клиновидного профиля из прямоугольной и круглой заготовок	58
3.3. Влияние тенденции клиновидного профиля к ребровому изгибу на выбор режима обжатий при его прокатке	63
3.4. Экспериментальное исследование прокатки клиновидного профиля	67
3.5. Экспериментальное исследование схемы прокатки круг-гладкая бочка-круг	70
3.6. Методика расчета вытяжки и уширения при прокатке прямоугольных, клиновидных и круглых профилей на непрерывном стане	73
3.7. Жесткость рабочих клеток 350 и 300	77

4. Освоение прокатки прямоугольных, клиновидных и круглых профилей и получение из них холодноотянутого изделия	84
4.1. Освоение производства полосовых профилей	84
4.1.1. Технологические режимы прокатки	84
4.1.2. Особенности волочения коллекторных полос	89
4.1.3. Техничко-экономические результаты освоения прокатки полосовых профилей	91
4.2. Разработка и реализация технологии прокатки круглых профилей и медной катанки	92
4.3. Роль и совершенствование арматуры ПНС 250	99
5. Совершенствование технологии производства профилей из медных сплавов: достижения и перспективы	104
5.1. Зависимость структуры и свойств кадмиевой бронзы от режимов пластической и термической обработки	104
5.2. Деформируемость слитков кадмиевой бронзы в зависимости от технологических факторов литья и прокатки	112
5.3. Повышение качества прессованной заготовки из кадмиевой бронзы для горячей прокатки	116
5.4. Уменьшение окисления медных полуфабрикатов при нагреве и прокатке	119
5.5. Профилактика дефектообразования при горячей прокатке профилей из медных сплавов	123
Приложение. Границы устойчивости высоких заготовок	128
Библиографический список	151

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время промышленность России переживает переход от производства в условиях государственно-планового регулирования к хозяйствованию, доминанта которого - ориентация на потребности платежеспособных заказчиков.

В этих условиях ярко проявляются такие особенности заводов цветметобработки, как широкий сортамент (номенклатура) продукции, малые объемы (малотоннажность) выполняемых заказов и частые переходы с одного профилиразмера на другой. Соответственно этому представляется правомерной ориентация на традиционный принцип: чем ближе производство к мелкосерийному, тем более универсальное и менее производительное оборудование следует использовать. С этой точки зрения в сортопрокатных цехах заводов ОЦМ представляются вполне уместными морально устаревшие линейные станы. Однако они плохо поддаются механизации и требуют тяжелого физического труда.

Диалектика же переживаемого промышленностью этапа такова, что экономические трудности подталкивают к применению современного оборудования типа полунепрерывных станов (ПНС). Опыт применения ПНС при сортовой прокатке черных металлов вполне положителен. Однако ориентация на использование ПНС с целью малотоннажной прокатки ставит проблему обеспечения гибкости производства, в рамках которой вопрос универсальности выступает лишь как подпроблема.

Идеал для подражания при решении проблемы гибкости - выработанное в современном машиностроении понятие гибкой производственной системы (ГПС), характеризуемой следующими аспектами:

- *универсальность* - способность ГПС в процессе нормальной работы системы без каких-либо ее модификаций выпускать партии изделий, различные по числу и номенклатуре (по форме и размерам);

- *приспособляемость* - способность ГПС после ее отладки перестраиваться (путем надлежащих изменений извне или путем самонастраивания) на выпуск других изделий (следствием приспособляемости является повторяемость, то есть способность ГПС неоднократно возвращаться к производству какого-либо из уже выпускавшихся изделий после завершения выпуска нового изделия);

- *нечувствительность (робастность)* - способность ГПС адаптироваться к количественным и качественным отклонениям заготовок, процессов, а также к непостоянству условий реализации процессов при гарантированном выполнении всех технических требований к системе без возникновения нарушений в ее работе и снижения качества изделий.

Принципиально новая для заводов цветметобработки проблема эксплуатации сортопрокатного полунепрерывного стана (ПНС) 250 в режиме гибкой производственной системы решена в условиях АО «Каменск-Уральский завод ОЦМ». Описание подходов к этой проблеме, использованных приемов и полученных результатов составляет ядро данной монографии. Кроме того, в книге рассмотрена гамма сопутствующих вопросов – от теоретических до сугубо производственных. Особое внимание уделено важному в прикладном отношении вопросу об устойчивости при сортовой прокатке. Его рассмотрение с принципиально новых для теории прокатки позиций вынесено в отдельное Приложение.

Изложенный в монографии опыт модернизации и освоения высокопроизводительного ПНС 250, ориентированного на производство нетипичного для таких станов широкого сортамента проката малотоннажными партиями, может быть полезен специалистам как проектирующим, так и эксплуатирующим подобное оборудование.

1. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО МЕЛКОСОРТНОГО СТАНА 250 И ЕГО МОДЕРНИЗАЦИЯ

На АООТ «Каменск-Уральский завод ОЦМ» в течение 15 лет эксплуатируется полунепрерывный стан 250, спроектированный и построенный ЭЗТМ. Схема расположения основного и вспомогательного оборудования показана на рис. 1.1; его основные параметры приведены в табл. 1.1. Сортамент стана обширен - включает несколько десятков профиларазмеров, специфика же производства такова, что прокатка осуществляется небольшими партиями - объем партии в самом благоприятном случае исчисляется лишь десятками тонн. Примеров применения в таких условиях непрерывных станов на заводах по обработке цветных металлов ранее не было.

1.1. Состав ПНС 250 и его достоинства

Стан предназначен для прокатки малотоннажных партий заготовок под последующее волочение широкого сортамента полос прямоугольного и клиновидного сечений шириной 30...120 мм и круглых профилей диам. 8...40 мм из меди и кадмиевой бронзы.

Основное оборудование включает обжимную клеть трио 500 (N 1) и три непрерывные группы (НГ): 350 (8 клетей, N 2-9), 300 (4 клетки, N 10-13) и проволочную 250 (3 вертикальные и 3 чередующиеся с ними горизонтальные клетки, N 14-19). Вспомогательное оборудование: летучие ножницы усилием 150 кН (для резки проката на мерные длины после

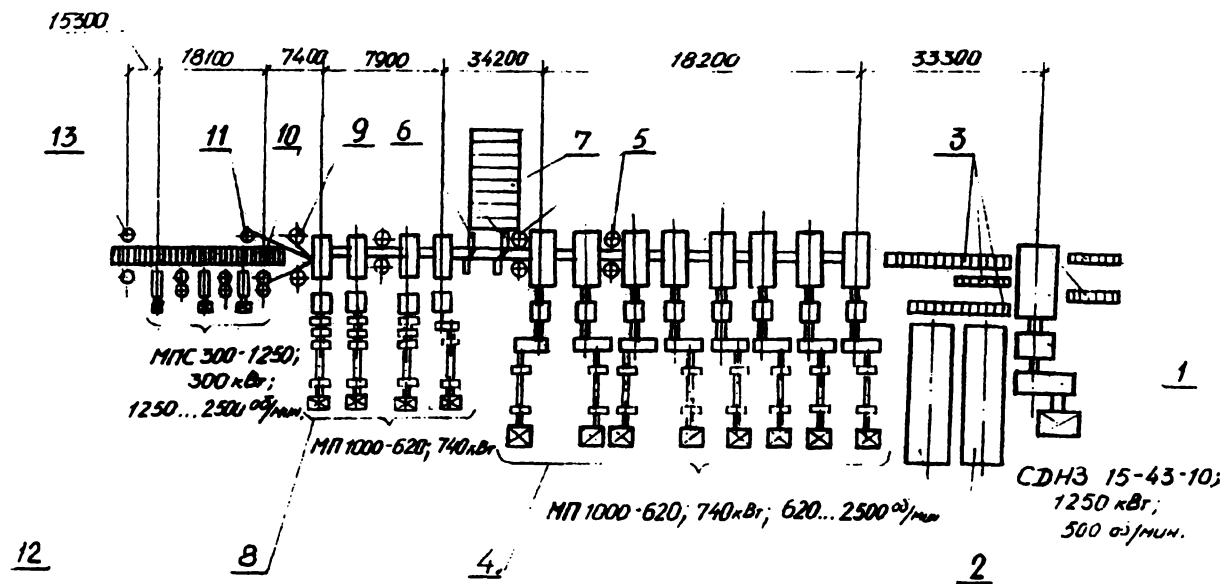


Рис.1.1. Схема расположения оборудования ПНС 250: 1 - линия ОК трио 500; 2 - методические нагревательные печи; 3 - ролланги; 4 - НГ 350; 5 - кромочные клетки; 6 - летучие ножницы; 7 - транспортер-холодильник; 8 - НГ 300; 9 - сортовые моталки; 10 - пластинчатый транспортер; 11 - полосовая моталка; 12 - НГ 250; 13 - моталки Эденборна

Таблица 1.1

Характеристика рабочих линий ПНС 250

Группы клетей стана	Номера клеток	Рабочий валок			Поперечное смещение клетей, мм	Мощность электро- двигателя, кВт	Параметры прокатки	
		диаметр, мм	длина бочки, мм	подшипники			усилие, МН	момент, МН х м
Обжимная ОК 500	1	500	1200	тексто- литовые	± 370	1250	2,0	0,18
НГ 350	2-3-4-5-6-7-К-8-К-9	350	700	ПЖТ	± 300	740	1,3	0,05
НГ 300	10-11-К-12-13	300	600	ПЖТ	± 275	740	0,7	0,02
НГ 250	14В-15Г-16В-17Г-18В-19Г	250	400	ПЖТ	± 180	300	0,0635	0,00172
Кромочная (вертикальная) клеть		200	80	качения	500	25	0,01	0,00013

НГ 350) и усилием 50 кН (для аварийной резки раската перед НГ 300); транспортер - холодильник (для уборки проката, разрезанного на мерные длины); две моталки для круглых профилей и намоточное устройство для полос (для уборки проката после НГ 300); две моталки Эденборна (для уборки катанки); пластинчатый транспортер; навешиватель бунтов и др.

Для того чтобы при таком широком сортаменте современный полунепрерывный стан был достаточно производителен, его механическое и электрическое оборудование должно обладать специфическими особенностями.

Достоинства стана таковы.

1. Непрерывные группы удачно сочетаются с обеспечивающей их подкатом обжимной клетью. Обжимная клеть трио - компактный агрегат, рассчитанный на четырехпроходную полностью автоматизированную прокатку; за счет раздельных рольгангов - подводящего, двух рабочих и отводящего, легкого подъемного стола и кантовальных досок обеспечивается одновременная прокатка двух слитков, что гарантирует бесперебойную подачу промежуточной заготовки для непрерывных групп стана с темпом 10...12 с.

2. Все клетки имеют специальные механизмы для перемещения их перпендикулярно линии прокатки (табл. 1.1). Благодаря этому можно вывести на линию прокатки любую комбинацию калибров, нарезанных на валках, и тем самым быстро осуществить необходимую подстройку или переход с одного профилеразмера на другой. Это весьма ценное достоинство стана в условиях прокатки широкого сортамента.

3. Трудно переоценить и такое достоинство стана, как индивидуальные приводы рабочих клеток и вспомогательных механизмов. Это достоинство электрооборудования ощутимо проявилось при разработке калибровок для стана: ни разу не пришлось идти на какие-либо ограничения (в ущерб идеям калибровки) для обеспечения условия непрерывной прокатки. Практически любые сочетания вытяжек в непрерывных группах стана оказывались возможными благодаря широким пределам регулирования скорости вращения двигателей.

4. Важным достоинством стана, обеспечивающим работу его в широком сортаменте, является оборудование стана разнообразными уборочными средствами. Так, полосы шириной 60...125 мм и прутки относительно больших диаметров (20...40 мм), прокатка которых завершается в НГ 350, режутся на мерные длины (4...6 м) летучими ножницами усилием 150 кН и снимаются с рольганга на цепной транспортер-холодильник. Круглые профили диаметром 12...20 мм принимаются установленными после группы 300 двумя сортовыми

моталками типа Гаррета (с тангенциальным подводом проката к барабану); прямоугольные и клиновидные полосы шириной 30...60 мм подаются после предварительного рассева (укладки «змейкой») в кармане-накопителе на специализированную моталку, формирующую плоский бунт. И, наконец, как отмечалось, уборка со стана круглых профилей диаметром менее 12 мм, т.е. катанки, осуществляется двумя моталками типа Эденборна.

5. Все клетки стана, за исключением кромочных, имеют высокую прочность, а все двигатели - достаточно большую мощность, благодаря чему на стане беспрепятственно можно реализовать самые тяжелые режимы прокатки, которые требуются, например, при производстве широких полос из кадмиевой бронзы, отличающейся значительным сопротивлением деформации.

1.2. Основные недостатки стана и их устранение

Наряду с отмеченными достоинствами стана (индивидуальный привод рабочих клетей с достаточно большой мощностью и широким скоростным регулированием; возможность значительного поперечного перемещения клетей; высокая прочность клетей и др.) в процессе освоения прокатки разнообразных профилей и особенно самого мелкого из них - катанки проявились и существенные недостатки стана.

Недостатки были предопределены изначально. Во-первых, повлияла традиция проектировщиков выбирать для прокатки цветных металлов оборудование более дешевое и соответственно более ограниченное по своим возможностям, нежели оборудование станов для прокатки стали. Во-вторых, сказалась длительность проектирования, изготовления и монтажа ПНС 250, приведшая к ощутимому моральному старению заложенных в проект технических решений. Остановимся на недостатках оборудования и приборной оснастки стана, которые создали серьезные трудности в его освоении, и рассмотрим с критических позиций конструктивные решения по отдельным агрегатам.

1. Высокопроизводительный полунепрерывный стан не оборудован системой автоматического регулирования натяжения (САРН); более того, практически нет условий для оснащения его такой системой: непригодна для этого конструкция межклетевых желобов; тесно установлены клетки в НГ; операторы лишены возможности наблюдать за образованием петли и т.п.

2. Обжимная клеть, как уже отмечалось, хорошо приспособлена для четырехпроходной прокатки. Но за четыре прохода из вайербарса сечением 100х100 мм, являющимся основным исходным слитком для стана, получается заготовка 60х60 мм. Из нее можно выкатать полосу шириной не более 90 мм, тогда как в сортаменте имеются полосы

шириной до 125 мм, для прокатки которых необходимо получать в обжимной клети более широкую заготовку. В процессе освоения стана эту задачу решили следующим образом. Для получения полос шириной до 110...115 мм четвертый проход в обжимной клети проводят в калибре, после которого раскат сечением 50х90 мм на отводящем рольганге самопроизвольно кантуется и поступает в группу 350. Для прокатки из этого же раската полос шириной до 120...125 мм применили разгонный калибр, нарезанный на валках первой клети НГ 350.

3. Предусмотренные проектом в составе НГ 350 и 300 вертикальные клети маломощны, что значительно усложняет прокатку из-за необходимости кантовать раскат. Непрерывные группы клети должны выдавать полосы разной ширины: от 60 до 125 мм - для группы 350 и от 30 до 60 мм - для группы 300. Получение полос разной ширины обеспечивается сочетанием прокатки заготовки на гладкой бочке и в ребровых калибрах. Наибольший эффект от такой калибровки достигается на станах, включающих горизонтальные и вертикальные (эджерные) клети.

Таковыми клетями оборудован, например, среднесортный стан 350 Череповецкого металлургического завода. К сожалению, эджерные клети в составе НГ 350 и 300 отсутствуют. Поэтому раскат после прокатки на гладкой бочке должен кантоваться на 90° для задачи в ребровой калибр, а затем опять кантоваться в пластовое положение для дальнейшей прокатки. Для кантовки раскатов на ребро в арматуре НГ 350 предусмотрены валковые кантователи (кантующие ролики), навешиваемые с выходной стороны клети (в НГ 300 - роликовые кантующие проводки), а для кантовки раскатов на пласт никаких устройств не предусмотрено. Поэтому в НГ 350 пришлось использовать

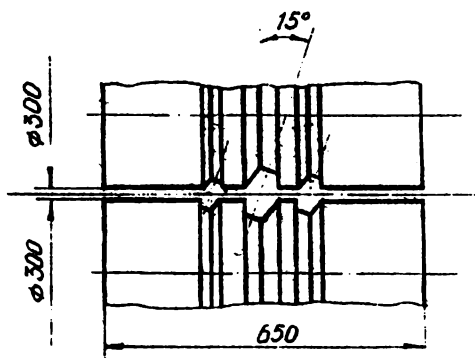


Рис.1.2. Валки кантователя с ребровыми калибрами для кантовки полос в пластовое положение

для этой цели тот же валковый кантователь (рис. 1.2). Валковый кантователь с такими калибрами опробован, и каких-либо сомнений в его работоспособности не возникло.

Для кантовки полос на пласт в клетях 300 спроектированы и изготовлены специальные роликовые кантующие проводки.

В начальный период освоения стана при прокатке полос, проводимой без кантовок и без применения ребровых проходов, для управления шириной полос пытались активно использовать кромочную клеть. Но при попытках достичь в ней даже минимального обжатия клеть, развивающая усилие прокатки до 10 кН (см. табл. 1.1), останавливалась, создавая аварийную ситуацию. Кроме того, размещение второй кромочной клетки после НГ 350 (см. рис. 1.1) нельзя признать удачным: известно, что при поперечном обжатии тонкой и широкой полосы деформация локализуется вблизи кромок полосы (аналогично процессу осадки высокой заготовки с двойным бочкообразованием) в виде местных наплывов металла, которые должны раскатываться в последующих горизонтальных проходах. При установке кромочной клетки в качестве замыкающей этой возможности нет, и на горячекатаной полосе могут появиться недопустимые по ТУ утолщения возле кромок. Маломощность привода, слабость конструкции и неудачное расположение кромочных клеток (см. рис. 1.1) полностью исключили их участие в технологическом процессе прокатки. Желательно было бы иметь в составе НГ 350 и 300 более мощные вертикальные клетки, способные обжимать полосы по ширине не менее чем на 5...6 мм.

4. При прокатке клиновидных полос для коллекторов электрических машин проектом предусмотрена замена последних клеток в НГ 350 и 300 специальными клетями с двухконусными валками, оси которых могут симметрично наклоняться под некоторым углом к горизонтали (рис. 1.3).

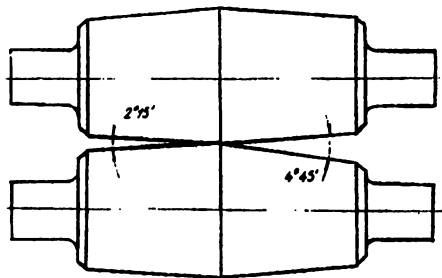


Рис.1.3. Двухконусные валки специальной клетки для прокатки клиновидного профиля

С этой целью клетки оборудованы верхним и нижним нажимным устройствами и подшипниками специальной конструкции. Понятно, что при перекосе осей рабочих валков получают наклон и шпиндели. Допустимый угол наклона примененных на стане шпинделей зубчатого типа составляет $1,5^\circ$, а для прокатки всего сортамента коллекторных полос допустимый угол наклона шпинделей должен быть порядка 3° . Шпиндели с шарнирными головками шарикового типа, обеспечивающие такие углы, были бы полезны не только для специальных клетей, но и более предпочтительны для других клетей 350, так как последние работают (в соответствии с предложенной калибровкой) в условиях широкого регулирования зазора между валками. Это также приводит к значительным перекосам шпинделей и резкому снижению работоспособности зубчатых шарниров.

Кроме того, включение в группы 350 и 300 лишь по одной специальной клетки не лучшим образом решает задачу прокатки полос клиновидного сечения, формирование которых из плоских прямоугольных заготовок требует применения, как минимум, двух клетей специальной конструкции. Наличие лишь одной специальной клетки для каждой группы заставляет нарезать на валках предшествующих ей подготовительной и предчистовой клетей ряд клиновидных калибров с фиксированными углами. Это затрудняет настройку стана, удлиняет время перехода с одного клиновидного профиля на другой и ухудшает использование валков (так как при износе лишь одного из калибров может возникнуть необходимость перевалки и переточки всего комплекта валков).

5. В комплект вспомогательного оборудования группы 350 входит цепной двухрядный трехсекционный холодильник, на который выдаются при температуре $700...750^\circ\text{C}$ и выше разрезанные на мерные длины полосы крупных сечений: от 5×60 до 15×125 мм. Холодильник - дорогое сооружение, занимает значительную площадь (20×30 м) и служит источником большого тепловыделения, что само по себе - особенно в летнее время - является нежелательным. Кроме того, спокойное, медленное охлаждение полос на холодильнике сопровождается дополнительным окислением металла. Это увеличивает время травления полос и приводит к повышению расхода металла, кислоты и затрат на нейтрализацию или регенерацию травильных растворов.

С целью сокращения производственной площади, объема межпролетных транспортных операций, уменьшения тепловыделений в рабочих зонах и снижения окалинообразования на прокате отказались от использования трехсекционного транспортера-холодильника, прокат стали собирать в карман-накопитель, расположенный после первой секции, и применили интенсивное душирование проката в потоке, отвечающее требованиям современного производства. В данном случае

охлаждение проката путем душирования водой магистрального давления оказало также положительное воздействие на процесс удаления окалины с его поверхности, преимущественно вследствие разности коэффициентов термического расширения металла и окалины. О пользе водяного охлаждения полос после прокатки свидетельствует и такой факт, как повышение твердости (на 50...60 МПа по Бриннелю) готовых холодноотянутых коллекторных полос из кадмиевой бронзы, полученных из катаной заготовки, по сравнению с полосами из прессованной заготовки. Последнее обстоятельство важно при организации выпуска коллекторных полос высокой твердости.

6. Проволочная группа стана, состоящая из шести чередующихся горизонтальных и вертикальных клетей 250, представляет на сегодня явно устаревший вариант чистовых групп мелкосортных проволочных станов. По такому варианту теперь не строится ни один стан подобного типа. Это определяется тем, что клетки чрезвычайно громоздки, тяжелы и дороги. Достаточно сказать, что при усилиях прокатки, не превышающих 50...60 кН, их масса составляет 12...13 т. Клетки сложны в настройке и ремонте, неудобны в работе. Гораздо современнее на их месте выглядели бы чистовые блоки той или иной конструкции или непрерывная группа с клетями, наклоненными под углом 45° к горизонту, бесстанинной конструкции с консольно расположенными дисковыми валками.

Проволочная группа имеет в качестве уборочных средств две моталки типа Эденборна. Конечно, для катанки эти моталки оптимальны. Но в номенклатуре завода довольно много мелких полос прямоугольного и клиновидного сечений. Заготовками для них должны служить полосы с сечением 25x4...15x3 мм, равновеликим сечению катанки диаметром 12...8 мм. Получение таких полос в группе 300 затруднительно, так как требует применения для ОК 500 и НГ 350 и 300 отдельного варианта калибровки, рассчитанного на форсированный режим обжатий. Использование же для прокатки мелких полос группы 250 оказывается невозможным из-за непригодности моталок Эденборна для смотки полосовых профилей.

7. Привод рабочих валков клетей НГ 250 осуществляется безредукторно и отдельно для каждого вала, причем, если один валок (основной) приводится от двигателя 300 кВт, то второй (вспомогательный), так называемый шлепп-валок, - от двигателя мощностью всего 25 кВт. Стремление проектировщиков сэкономить на мощности привода породило значительные трудности в настройке процесса прокатки в этой группе.

8. По проекту питание постоянным током приводов основного и вспомогательного оборудования производится с помощью недостаточно надежных и экологически небезвредных ртутных преобразователей, которые не обеспечивают требуемого качества регулирования в некоторых переходных режимах; кроме того, отсутствует возможность перевода, при необходимости, на групповое регулирование скорости рабочих клеток.

В процессе освоения на ПНС 250 прокатки широкого сортамента полосовых электротехнических профилей в конструкцию многих его узлов и механизмов были внесены помимо указанных выше дополнительные изменения и усовершенствования. Основные из них таковы.

1. Кантовальную доску, принимающую раскат после первого прохода в обжимной клет, снабдили пневмоприводом, что устранило сбои в работе клетки.

2. Для улучшения задачи раската установлены два дополнительных ролика на подъемном столе ОК 500; ликвидирован приемный карман для раската, выходящего из второго калибра клетки, так как при изгибе конца полосы он препятствовал нормальной работе стола.

3. За ОК 500 смонтирован карман для сбрасывания в него с помощью пневмопривода раскатов из клетки в случае остановки по какому-либо причинам процесса прокатки в НГ 350.

4. Упрощена схема подачи воды для охлаждения подшипников с текстолитовыми вкладышами ОК 500 (уменьшено количество труб, ликвидированы две задвижки диаметром 80 мм). При снижении давления воды ниже нормативного уровня и во избежание вследствие этого ускоренного износа подшипников предусмотрена подача звукового сигнала от манометра.

5. С целью повышения эффективности гидросбива, а также смыва окалины из ОК 500 и улучшения тем самым качества готового проката проведены следующие мероприятия:

- дополнительно организована подача воды на заготовку перед первым проходом и после третьего прохода (по проекту - только после первого прохода);
- подача воды после первого прохода предусмотрена внутрь выводной проводки (ранее - за выводной проводкой), при этом улучшены условия труда прокатчиков и условия работы электродвигателя задающего ролика;

- вместо одного общего вентиля подачи воды высокого давления установлены три независимых вентиля, позволяющих перекрывать поступление воды к любому калибру - при необходимости, например, улучшении условий захвата, а также для облегчения наладки проводковой арматуры.

6. Для облегчения перевалки валков в ОК 500 вытяжной зонт, расположенный над клетью, выполнен с шарнирами, обеспечивающими возможность его поворота на 90° градусов. До модернизации зонт при каждой перевалке приходилось демонтировать, а затем монтировать вновь.

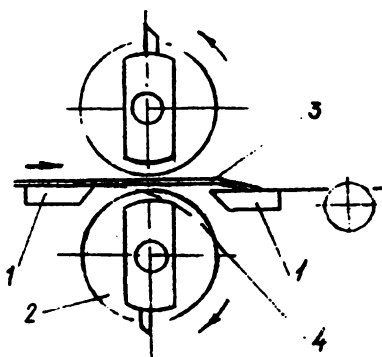


Рис.1.4. Схема усовершенствования летучих ножниц усилием 150 кН: 1 -проектные опоры; 2 - дополнительная опора в виде барабана; 3 -положение полосы при резке с участием дополнительной опоры; 4 - то же, но без дополнительной опоры

7. Усовершенствованы летучие ножницы усилием 150 кН, установленные после группы 350: во избежание самопроизвольного изгиба горячекатаных полос ножницы оборудованы барабанами, служащими дополнительной промежуточной опорой для проката (рис. 1.4).

8. Для предотвращения выхода за пределы открытых (по проекту) межклетевых желобов переднего конца клиновидной полосы, имеющей остаточную серповидность, на желобах установлены съемные защитные крышки, обеспечивающие, кроме того, быструю разборку и легкое удаление застрявших полос.

9. С целью увеличения межвалкового зазора до 35 мм, необходимого для прокатки толстых полос, в клетях НГ 350 удлинени шт

10. В связи с частым зацеплениями широких полос за решетки транспортера-холодильника, установленного за НГ 350, их заменили плитовым настилом. Аналогично широким, узкие полосы часто застревали в пластинчатом транспортере, расположенном за вибратором-рассеивателем. Транспортер вместе с приводом ликвидировали и на его месте для приема и размещения полос после рассева смонтировали карман с гладким днищем, наклоненным в направлении моталки, в результате достигнута надежная уборка узких полос.

11. С целью стабилизации работы установленной за НГ 300 моталки для узких полос, формирующей плоский бунт, ее существенно модернизировали; из пяти задающих вертикальных роликов два демонтировали; на входе смонтировали холостой вертикальный ролик; для прижима полосы к столу моталки во время намотки установили горизонтальный ролик, регулируемый по высоте с помощью пневмоцилиндра; для заправки конца полосы в моталку в ее четырех утапливаемых штырях выполнены пазы. Кроме того, задающие ролики установили в одну линию с вибратором-рассеивателем и моталкой, после чего задача полосы в моталку стала происходить автоматически, в отличие от прежней ручной задачи – трудоемкой, опасной и ограничивающей производительность.

12. Предложены не предусмотренные комплектом поставки стана простые и удобные конструкции съемников для демонтажа ПЖТ с шейки валка и для снятия маслоудерживающего кольца ПЖТ. Для проверки уплотнений ПЖТ после ревизии или ремонта (при отсутствии специального устройства) использована станция зарядки маслом редукторов стана, чем обеспечен надежный контроль плотности манжет ПЖТ и исключена повторная разборка подшипников при обнаружении течи масла после установки валкового узла в рабочую клеть.

13. Важнейшим мероприятием по модернизации электрооборудования ПНС 250 явился переход от питания главных приводов НГ стана через ртутные преобразователи к тиристорному управлению (более подробная информация об этом содержится в подразделе 1.3).

14. Существенные изменения внесены в систему подачи охлаждающей воды на валки клеток НГ 350 и 300. Согласно проекту вода к валкам поступала по резиновым шлангам, создающим помехи прокатчикам при перевалке валков и настройке арматуры, кроме того, шланги сторали при застреваниях полос. Изменения значительно упростили систему и свелись к следующему:

- вместо шлангов диам. 50 мм и длиной по 8 м каждый смонтировали стальные трубы, выгнутые по месту;
- вентили диаметром 50 мм заменили на вентили диаметром 40 мм, их количество на каждую клеть уменьшили в два раза;
- с целью смыва окалины, накапливающейся в выводных проводках, воду к валкам подвели через проводки;
- для улучшения удаления с полосы окалины воду к проводке клетки 2-350 (в которой прокатка осуществляется в ребровом калибре) подают через крышку проводки непосредственно на полосу.

1.3. Модернизация механического, электрического и нагревательного оборудования стана

Первоначально ПНС 250 использовался для выпуска промышленных партий заготовок полосовых профилей крупных сечений и в небольших количествах - круглых профилей диаметром 22...26 мм с окончанием прокатки и тех и других в НГ 350. При этом отсутствие на стане САРН ощущалось постольку, поскольку разноширинность заготовок, получаемых на стане, порождала известные трудности при последующем волочении. В полный рост проблема обеспечения стабильных размеров проката по его длине встала при освоении выпуска профилей более мелких сечений с окончанием их прокатки в НГ 300 и 250.

В 1992 г. понадобилось освоить на ПНС 250 прокатку медной катанки диаметром 8 мм, что потребовало существенной дополнительной модернизации электромеханического оборудования стана [1]. Ниже приведены основные ее результаты¹.

1.3.1. Механическое оборудование

1.3.1.1. Исходя из технологических соображений, ужесточили режим обжатий в НГ 350 и НГ 300 при получении в них промежуточных профилей для последующей их прокатки на катанку в НГ 250. Это позволило уменьшить количество клетей в НГ 250 с шести до четырех, удалив с линии прокатки вторую пару клетей (N 16+17). В результате такого решения стало возможным осуществить в НГ 250 прокатку с созданием петли, крайне необходимым и полезным из-за отсутствия на стане САРН. При реализации прокатки с петлей в образовавшемся межклетевом промежутке длиной 7,7 м между парами клетей N 14+15 и N 18+19 установили сваренный из листовой нержавеющей стали петлевой карман и самораскрывающийся желоб (петлеулавливатель).

¹ В работе активно участвовали сотрудники ПО Уралэнергоцветмет, бригады электриков стана 250 (руководитель А.И. Токарев) и механиков цеха (руководитель А.Н. Шестаков).

1.3.1.2. Спроектирована и изготовлена оригинальная и простая по конструкции универсальная траверса² для перевалки как горизонтальных, так и вертикальных клетей НГ 250. Это резко облегчило довольно частые перевалки в этой группе, осуществляемые только клетями.

1.3.1.3. Проведена значительная работа по совершенствованию моталок Эденборна для уборки катанки.

Полностью переделан узел тянущих роликов моталок, а именно:

- в связи с застреваниями катанки в моталке, вызванными остановками основного тянущего ролика под нагрузкой из-за слабости его привода, вместо предусмотренного проектом двигателя мощностью 6 кВт установили двигатель мощностью 25 кВт, после чего работа моталки нормализовалась;
- снабдили электродвигателем мощностью 3 кВт бывший по проекту холостым прижимной ролик, приданный к основному тянущему ролику.

Представляется весьма полезным изготовление не предусмотренного проектом моталки механизма осевой регулировки прижимного ролика с целью более полного использования длины его бочки с нарезанными на ней ручьями при их совмещении с ручьями основного тянущего ролика.

На высотной отметке узла тянущего ролика обеих моталок устроены площадки, не предусмотренные проектом, но крайне необходимые для ремонта и обслуживания моталок в процессе их эксплуатации.

Особое внимание было уделено подбору конфигурации и изготовлению направляющей трубы, от надежной работы которой непосредственно зависит работоспособность моталки. Сложную форму трубы размером 48х5 мм из нержавеющей стали получают изгибаем и после приварки к ней фланца устанавливают в моталку. В один конец трубы, расположенный на вертикальной оси моталки и снабженный фланцем, задается тянущими роликами катанка, а из другого конца, описывающего при вращении трубы круг в горизонтальной плоскости, катанка выходит и в зависимости от скорости вращения трубы либо ложится витками на стол вокруг барабана, расположенного в воде, либо более или менее плотно наматывается на сам барабан.

Согласно паспортной характеристике моталки, имеющей барабан диаметр 0,8 м, внутренний и наружный диаметр бунта должны составлять 0,8 и 1,4 м соответственно. Потребители предпочли бы бунт с внутренним диаметром 0,6...0,7 м. Однако поскольку осуществить стабильный процесс смотки без участия барабана пока не удается (во вращающейся трубе

² Траверса предложена и спроектирована конструктором ПКО завода И.П. Клейнбугом

остается и многократно скручивается конец проката, неупорядочено располагаются витки катанки внутри бунта), то это остается одной из задач на ближайшее будущее.

1.3.1.4. Некоторые дополнительные усовершенствования

Изготовлен и в конце рольганга перед летучими ножницами усилием 50 кН смонтирован автоматический упор, предназначенный для остановки порезанных на мерные длины полос после НГ 350 и автоматически убирающийся с линии прокатки при передаче раската в НГ 300.

Создана пневмосистема управления рабочими органами оборудования хвостовой части стана как с ручным управлением пневмокранами с рабочих мест прокатчиков, так и с дистанционным управлением с пультов операторов стана.

Для надежного изгиба полосы вниз по выходе из той или иной горизонтальной клетки в составе НГ 250 скорость вращения шлепп-валка увеличена по отношению к скорости основного валка на 5...10%.

1.3.2. Электрическое оборудование

Прокатку и уборку катанки в принципе невозможно было осуществить без проведения рассмотренных ниже мероприятий по переналадке электрооборудования и модернизации схемы управления приводами. Эта работа включала, в частности, начатый в 1988 г. перевод на тиристорное управление двигателями непрерывных групп, а также внесение принципиальных изменений в систему регулирования их скоростных режимов. Последовательность работы и полученные при этом результаты таковы.

1.3.2.1. Прокатка промышленных партий заготовок медных шин и коллекторных полос подтвердила эффективность использования тиристорных преобразователей для управления главными приводами рабочих клеток НГ 350 и НГ 300: повысились стабильность скоростного режима и надежность его настройки; прекратились крайне нежелательные скачкообразные изменения скорости приводов некоторых клеток в переходных режимах, которые не удавалось устранить при прежней схеме их питания с использованием ртутных преобразователей. С другой стороны, при этом возникла проблема, порожденная спецификой тиристорного управления, а именно: за повышенную стабильность скорости привода каждой отдельной клетки пришлось заплатить трудностями в настройке скоростного режима непрерывных групп в целом, так как привод стана стал более «жестким», не позволяющим компенсировать как неточности предварительной настройки, так и погрешности, вносимые часто изменяющимися условиями прокатки.

При прежнем варианте управления главными приводами с помощью ртутных преобразователей за счет более мягких характеристик некоторые погрешности предварительной скоростной настройки, а также часто

изменяющиеся условия прокатки в значительной мере компенсировались вследствие взаимовлияния электроприводов соседних клетей на работу друг друга (например, при увеличении нагрузки в одной из клетей уменьшалась скорость вращения ее привода, что приводило к перераспределению нагрузки между смежными клетями и соответствующему изменению их скорости). При переходе на тиристорное управление и при использовании в системе автоматического регулирования пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов скорости, т.е. при отсутствии статической ошибки в регулировании скорости под нагрузкой, увеличилась продолжительность настройки при смене прокатываемого профиля, стало невозможным использовать прежнюю настройку стана после его остановки более чем на 6...8 ч. Выход был найден в создании демпфированного скоростного режима отдельных клетей, рассмотренного ниже.

В 1992-93 гг. осуществлен переход от питания через ртутные преобразователи (проектный вариант) к питанию через тиристорные преобразователи приводов шлепп-валков клетей НГ 250, моталок, тянущих роликов моталок, ножниц.

1.3.2.2. При использовании ПИ-регуляторов скорости главных приводов (проектный вариант) с их высоким быстродействием и отсутствием статической ошибки в регулировании скорости не удавалось получить нормальную подстройку скоростного режима под условия прокатки: при появлении нагрузки на привод (в момент захвата металла валками) и одновременно возникавшей просадке скорости данной клетки Δv_k (рис. 1.5, а) привод стремился в короткий временной промежуток выйти на прежний, имевшийся до нагрузки, уровень скорости. В итоге имело место так называемое перерегулирование скорости, т.е. жесткий скоростной режим. Возможность прокатки с образованием петли при просадке скорости сразу же исчезала, и немедленно возникал режим натяжения, особенно вредный в условиях прокатки мелкого сорта из меди, обладающей низким сопротивлением деформации и высокой пластичностью.

В отличие от ПИ-регулятора при работе с обладающим статической ошибкой пропорциональным (П) регулятором, которым снабдили приводы клетей N 8, N 12 (предпоследних в НГ 350 и НГ 300)³ и приводы всех

³ Клетки N 8 и N 12 выбраны из следующих соображений. Во избежание недопустимого искажения сечения профиля непрерывные группы стана настраивают на работу либо с незначительным натяжением, контролируемым бригадиром визуально и пробой по усилию прогиба полосы в межклетевом промежутке, либо с минимальным петлеобразованием, контролируемым также визуально (стан не оборудован петлевыми устройствами). Поэтому смягчать характеристику привода целесообразно для той клетки, перед которой имеется наибольший межклетевой промежуток; при этом и натяжение, и образование петли менее опасны возможными негативными последствиями.

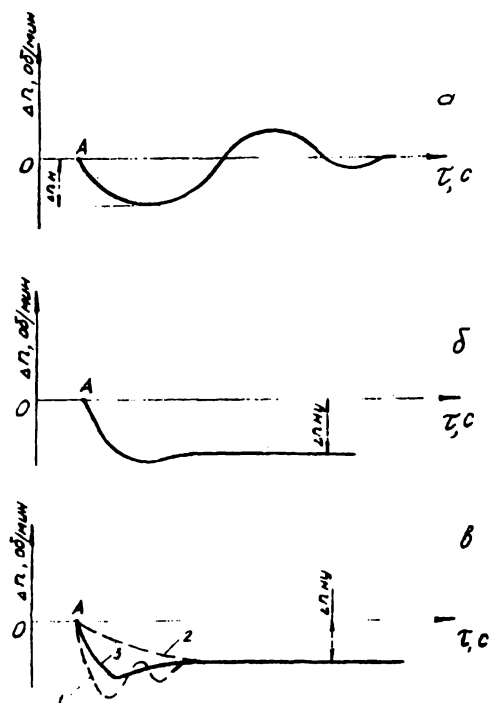


Рис.1.5. Варианты регулирования скоростного режима привода: а - жесткий с перерегулированием скорости при ПИ-регуляторе; б - с демпфированием скорости в зависимости от нагрузки при П-регуляторе; в - демпфированный с выходом на установившийся уровень скорости в зависимости от коэффициента $K_{рс}$; А - момент появления нагрузки в клетях (момент захвата металла валками); $\Delta n_{\text{н}}$ - величина кратковременной просадки скорости под нагрузкой; $\Delta n_{\text{у}}$ - величина установившейся просадки скорости под нагрузкой; 1 - $K_{рс}=30$; 2 - 15; 3 - 22,5

клетей НГ 250, просадка скорости $\Delta n_{\text{у}}$ зависит от нагрузки (рис 1.5, б). Изменение во времени нагрузки в смежных клетях, взаимодействующих через полосу, приводит к различному уровню просадки скорости той клетки, привод которой снабжен П-регулятором (с его мягкой характеристикой регулирования скорости), и за счет этого удается получить более устойчивый скоростной режим прокатки. Определенный темп выхода на этот уровень задают путем изменения коэффициента регулирования скорости $K_{рс}$. Качественная картина зависимости темпа

выхода на установившийся уровень просадки скорости в зависимости от Крс изображена на рис. 1.5 в. Из трех опробованных значений Крс, равных 30; 15; 22,5, последний оказался наиболее приемлемым.

1.3.2.3. Наряду с групповым и индивидуальным регулированием приводов НГ стана осуществлен вариант попарного регулирования (для клеток N 14+15 и N 18+19), целесообразность которого обусловлена малым межклетевым промежутком внутри пары (1,25 м), не позволяющим вести прокатку с петлей и вынуждающим исключительно точно синхронизировать скорости смежных клеток.

1.3.2.4. С целью выравнивания скоростей приводов обеих проволочных моталок, питаемых от одного преобразователя, предусмотрели возможность подстройки с рабочего места прокатчика скорости вращения направляющей трубы в пределах $\pm 20\%$.

1.3.2.5. Для отрезки переднего захоложденного или разлохмаченного конца проката, поступающего в НГ 300, перед летучими ножницами усилием 50 кН установлено фотореле с целью подачи (при необходимости) сигнала на привод ножниц.

1.3.2.6. Одним из существенных недостатков приборной оснастки стана являлось отсутствие на пультах управления всех НГ приборов точного указания скорости прокатки каждой клетки. Установленные на пультах приборы низкой точности и чувствительности не позволяли оператору осуществлять и поддерживать заданный калибровкой скоростной режим работы стана, что требовало ручной настройки скорости каждой клетки с помощью переносного тахометра. На пультах были установлены новые приборы - цифровые вольтметры типа Ф210-05/02, позволяющие устанавливать и контролировать с пультов управления скорости всех клеток с достаточной для настройки точностью до 0,1 м/с. Это коренным образом улучшило систему настройки скоростного режима стана, особенно при смене прокатываемого профиля.

1.3.2.7. Дальнейшее повышение точности скоростного управления станом на ходу было достигнуто после установки на пультах верньерных рукояток регулирования скорости по схеме «грубо-тонко» в соотношении 1:4.

1.3.2.8. В результате модернизации электроприводов стана появилась возможность группового регулирования скоростей, при которой настройку процесса прокатки ведут в режиме невысоких скоростей, а затем выводят одновременно всю НГ на рабочие скоростные режимы.

1.3.3. Нагревательное оборудование

Для нагрева металла под прокатку по проекту в состав ПНС 250 включены две газовые двухзонные методические печи. Предусматривая установку двух высокопроизводительных печей, проектировщики предполагали, по-видимому, высокий темп снабжения стана нагретым металлом - подобно ситуации на пермском заводе «Камкабель», где непрерывный стан 250 также снабжен двумя нагревательными печами. Однако в отличие от этого стана, работающего на исключительно узком сорimente - медной катанке диам. 8 мм, ПНС 250 КУЗОЦМ рассчитан на выпуск изделий широкого сортамента, поэтому темп прокатки на нем значительно ниже.⁴ Наличие же двух печей оказалось полезным, так как обеспечивало возможность, ограничиваясь использованием одной печи, модернизировать другую печь. Это же позволило безболезненно для работы стана заменить одну из них на печь более современной конструкции.

На первых этапах работы стана разноширинность проката была во многом обусловлена низким качеством нагрева, а именно его нестабильностью. Слитки достигали необходимой температуры (800...900° С) в первой зоне печи - методической, а после прохождения второй зоны - томильной - их температура снижалась значительно ниже регламентированной. Из-за ненадежной работы электромеханического оборудования стана в этот период и нестабильного процесса прокатки слитки в томильной зоне печи находились сверхнормативное время и к моменту выдачи остывали настолько, что их приходилось направлять на повторный нагрев со всеми вытекающими из этого негативными последствиями.

Печь подвергли реконструкции: четыре горелки из методической зоны перенесли в томильную (по две с каждой стороны); в сводах поперечных каналов томильной зоны предусмотрели отверстия для подвода тепла от находящихся в каналах горелок и тем обеспечили более равномерный нагрев металла по всей длине печи.

Проведен также ряд других мероприятий, способствовавших нормализации работы печи.

1. Со стороны загрузки печи на подводящем рольганге установлен дополнительный съемный упор, позволяющий при нагреве прессованных заготовок из БрКд1 более равномерно загрузить все четыре глиссажные трубы и исключить перегрев и коробление одной из труб.

⁴ В налаженном режиме скорость прокатки в чистовой клети медной катанки диам. 8 мм составляет на КУЗОЦМ 14 м/с, на заводе «Камкабель» до 25 м/с.

2. Изменена конструкция подкладываемых под глиссажные трубы плит, изготовленных из жаростойкого чугуна. При этом достигнуто уменьшение массы плит на 17% и повышение их стойкости, что немаловажно вследствие их частого выхода из строя из-за растрескивания и необходимости трудоемкой замены.

3. Упрощена схема слива воды в системе охлаждения горелок. Это существенно улучшило тепловой режим печи, так как из-за малого диаметра труб этой системы (15 мм), значительной их длины (до 20 м) и большого количества поворотов они часто забивались грязью, и необходимо было проводить их продувку воздухом, во время которой соответствующие горелки приходилось отключать.

4. При необходимости выгрузки нагретых слитков через боковые окна печи требовалось разбирать часть футеровки окна и удалять некоторое количество шамотных кирпичей с последующей обратной их установкой. На боковых окнах смонтировали заслонки из листовой стали массой всего 10 кг, легко снимаемые и устанавливаемые вручную.

Согласно плану технического перевооружения одну из печей ПНС 250 заменили более современной (новой печи присвоен номер 2). Ниже приведены главные отличия технической характеристики нового теплового агрегата от старой конструкции (печи 1).

1. Печь 2 отапливается газовыми горелками ГНП-4Б, установленными под углом 15° к поду, что позволяет получить оптимальное расположение факелов в рабочем пространстве печи с настилением факелов на свод. Горелки ГНП-4Б - двухпроводные с поступлением в них воздуха с избыточным давлением 2 кПа от рекуператора и газа с избыточным давлением 4 кПа от газораспределительного устройства. Горелки печи 1 -инжекционного типа, рассчитанные на среднее давление газа внутризаводского газопровода.

2. Печь 2 оборудована двумя металлическими трубными рекуператорами противоточного типа, в которых воздух подогревается до 220°C . Печь 1 рекуператоров не имеет.

3. В соответствии с «Правилами безопасности в газовом хозяйстве» предусмотрено прекращение подачи газа на печь 2 при падении и повышении давления газа и падении давления воздуха. Автоматикой печи 1 такая защита не предусмотрена.

4. Сравнение показателей работы старой и новой печей по результатам комплексного опробования и наладки теплового режима печи 2 приведено в табл 1.2 и в комментариях не нуждается.

Таблица 1.2

Показатели работы печей №1 и №2

№ пп	Наименование показателей	Печь №1	Печь №2	Соотношение показателей
1	Средний часовой расход газа на печь, м ³ /ч	563,2	287,5	1.960
2	Средняя часовая производительность печи, т/ч	4,67	4,65	1.004
3	Удельный расход газа, м ³ /т	129,6	64,8	2,000

1.4. Варианты совершенствования станов типа ПНС 250

Многолетний опыт эксплуатации и проведенной модернизации ПНС 250 подсказывает в качестве вариантов совершенствования подобных станов следующие мероприятия, отвечающие требованиям гибкого перехода с профиля на профиль в условиях непрерывного стана, работающего в режиме частых переналадок и перестроек.

1. Для надежного управления шириной проката, упрощения калибровки и валковой арматуры в непрерывных группах стана нужны мощные и жесткие эджерные клетки.

2. Во избежание утяжки проката по толщине и ширине, особенно самого мелкого - катанки, нужна надежно работающая система автоматического регулирования межклетевых натяжений.

3. В связи с возможностью применения раздвижных по ширине калибров (см. подраздел 2.1) необходимо, чтобы валки каждой клетки имели осевую регулировку на величину до 10% от длины бочки валков.

5. Применительно к прокатке клиновидных полос целесообразно предусмотреть поворот клеток на небольшой угол в плане, компенсирующий тенденцию к поперечному смещению полосы.

6. Полезно применение комбинированных клеток, быстро перестраиваемых из горизонтальных в вертикальные и наоборот.

7. Ускорение и удешевление перехода с профиля на профиль может быть осуществлено при использовании клеток с бандажированными валками консольного типа и откидными элементами (станинами, проводками).

8. Необходимо предусмотреть возможность прокатки с использованием клеток и групп клеток в транспортном режиме, а также использование их для холодной прокатки с автономной подачей заготовки к первой клетке группы и уборкой полуфабриката.

9. Вместо проволоочной непрерывной группы устаревшей горизонтально-вертикальной компоновки целесообразно иметь чистовые блоки клеток современной конструкции.

10. Для лучшего использования возможностей проволоочной группы ее уборочные средства следует дополнить моталками для смотки профилной продукции, например, прямоугольного сечения.

11. В связи с необходимостью прокатки полос в условиях широкого регулирования межвалкового зазора следует применять шпиндели с шарнирными головками, допускающими углы перекаса до $4...5^{\circ}$.

12. Во избежание повышенного окиснообразования и снижения тепловыделений в атмосферу цеха необходимы установки для интенсивного охлаждения раската в потоке стана.

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос применения в составе такого стана предварительно напряженных горизонтальных клеток (ПНК) конструкции ВНИИМЕТМАШ. Он обстоятельно рассматривался в начале 80-х годов при формировании комплексной программы Минцветмет СССР по техническому перевооружению прокатных станов предприятий цветной металлургии. Вместе с тем жесткие требования ГОСТов и ТУ к ширине прямоугольных и клиновидных полос, к разнотолщинности круглых профилей и особенно медной катанки при отсутствии на стане САРН ставят в качестве первоочередной задачу повышения точности проката путем настройки и регулирования скоростей прокатки по клетям как внутри непрерывных групп, так и между группами. С учетом того, что жесткости клеток НГ 350 и 300 достаточно для получения проката заданной точности по толщине (см. подраздел 3.7), использование ПНК в составе стана взамен существующих клеток было признано нецелесообразным. Такое решение учитывает также, что максимально допустимое усилие при прокатке в ПНК 350, равное 0,55 МН, оказывается недостаточным: расчетное усилие прокатки широких полос из кадмиевой бронзы составляет 0,7 МН и может, при прокатке несколько захожденного металла, достигать еще больших значений. Для сравнения укажем, что максимально допустимое усилие прокатки используемых ныне клеток 350 составляет 1,3 МН (см. табл. 1.1). В НГ 300 ситуация аналогична.

Применение ПНК было бы оправдано в проволочной группе 250, где ими предполагалось заменить три горизонтальные клетки, допускаемое усилие для которых вдвое меньше, чем для ПНК 250. Однако оснащение НГ 250 в ее существующем варианте тремя ПНК представляется малоэффективным по следующим соображениям:

- существующие компоновка и состав НГ 250, как отмечалось выше, представляют собой явно устаревший вариант, связанный с повышенными габаритами и металлоемкостью клеток, сложностью в их настройке и ремонте, тесным расположением горизонтальных и вертикальных клеток и исключительно малым межклетевым промежутком (1,25 м) внутри пары;

- ранее указывалось, что для обеспечения процесса прокатки катанки с образованием петли существенно изменили проектный вариант компоновки НГ 250, а именно - уменьшили число клеток в группе с шести до четырех, удалив с линии прокатки вторую пару клеток (16 и 17).

Замена двух оставшихся горизонтальных клеток не устраняет этих принципиальных недостатков. Более эффективным решением представляется использование чистовых блоков известных конструкций или установка в линии прокатки блока клеток горячего калибрования.

1. Благодаря проведенной модернизации электромеханического оборудования и нагревательных печей стана 250 устранены основные его недостатки и решены следующие задачи: достигнут установленный регламентом режим нагрева медных слитков и меднокадмиевых заготовок; обеспечена стабильная работа обжимной клетки, непрерывных групп, вспомогательных механизмов и уборочных средств стана; переведены на питание через тиристорные преобразователи вместо ртутных главные приводы рабочих клеток всех трех непрерывных групп, а также приводы вспомогательного оборудования стана; наряду с групповым и индивидуальным регулированием скоростей главных приводов для клеток НГ250 реализован вариант попарного регулирования; улучшена система настройки скоростного режима стана путем установки на пультах управления приборов повышенной точности указания скорости прокатки каждой клетки.

2. После модернизации стана стало возможным решение важной технологической задачи: в условиях полунепрерывного стана обеспечена прокатка широкого сортамента прямоугольных и клиновидных полос, круглых профилей и катанки надлежащего качества, из которых посредством волочения получают

высококачественные изделия ответственного назначения - разнообразные электротехнические профили из меди и кадмиевой бронзы.

3. На основе опыта эксплуатации и модернизации стана 250 в качестве вариантов совершенствования подобных станков сформулирован комплекс требований, отвечающих условиям гибкого технологического процесса для непрерывного стана, работающего в режиме частых переходов с профиля на профиль.

2. КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШИРОКОГО СОРТАМЕНТА МЕДНЫХ ПРОФИЛЕЙ

2.1. Принципы выбора гибких систем калибров для широкосортаментной прокатки

Цель данного подраздела - коротко рассмотреть общие принципы универсализации калибровок прокатных валков и приемы решения этой задачи посредством видоизменения (модификации) калибров и схем прокатки.

Результаты литературного обзора и патентного поиска показали, что деятельность по освоению ПНС 250 в режиме многосортаментной прокатки не является уникальной. В частности, опыт такого рода получен при освоении двух полунепрерывных станов 250 в составе заводов черной металлургии. Для работы по созданию калибровок валков для ПНС 250 полезны данные об освоении аналогичных станов в условиях завода «Ижсталь» и Нижнесергинского металлургического завода [2,3].

Опыт Нижнесергинского ПНС 250 [3] представляет интерес в части получения за пять проходов в обжимной клетке стального подката сечением 50х50 мм из заготовок сечением 100х100 ... 120х120 мм, т.е. со средней вытяжкой за проход, равной 1,32 ... 1,42. Результат достигнут за счет использования двух традиционных ящичных калибров, выполнение первого из которых ребровым обеспечивает дополнительное преимущество -самопроизвольную кантовку раската в пластовое положение. Попутно решена задача интенсификации режима обжатий при сохранении хорошей устойчивости полос в калибрах. Сочетание ящичных и шестиугольных калибров подняло уровень гибкости калибровки и позволило повысить стабильность и ритмичность прокатки, увеличить производительность стана и улучшить условия труда.

Заслуживает внимания также подкрепленный опытом работы этого стана вывод о том, что в условиях многосортаментной прокатки целесообразно для формирования фасонных профилей использовать в качестве промежуточного раскат круглого сечения.

Исключительно высокие коэффициенты вытяжки (средняя вытяжка за проход на уровне 1,92) при прокатке меди (правда, в условиях узкого сортамента - при производстве катанки диаметром 8 мм) обеспечиваются использованием в качестве первого калибра в обжимной клети 500 ПНС 250 Пермского завода «Камкабель» ящичного калибра со значительными (порядка 0,43) выпусками, раскат из которого задается в диагональный квадратный калибр, а также последующим применением системы квадрат-шестиугольник, причем угол при вершине последнего составляет 38°.

Переходя к обобщениям, введем ряд терминов, позволяющих сделать компактным последующие изложения.

Полезно различать следующие типы калибров:

1) безручьевого (плоский) калибр, образованный участками гладких бочек валков;

2) ручьевого калибр, образованный противолежащими ручьями оппозитных валков, например, овальных; -

3) калибр, образованный противолежащими выступами оппозитных валков, например, разрезной (разгонный);

4) комбинированный калибр (комбинации типа ручей + гладкая бочка, ручей + выступ).

Различаются системы калибров: двоичная (например, овал - круг); троичная (овал - ребровой овал - круг или пластовый шестиугольник - ребровой шестиугольник - квадрат); четверичная (овал - ребровой овал - овал - круг); пятиричная (квадрат - плоский калибр - ребровой овал - овал - круг); шестиричная (ящик - шестиугольник - ромб - квадрат - овал - круг); N - ичная (например, совокупная система из N калибров всех клетей стана).

Система калибров является гибкой, если она позволяет получать не менее двух различных по размерам конечных профилей (товарных чистовых или профилей-полуфабрикатов).

Минисистема калибров - минимальная по числу калибров система, обеспечивающая заданное преобразование профиля (например, двоичная система овал - круг, обеспечивающая прокатку круга в круг меньшего диаметра).

Гибкая минисистема калибров - минимальная по количественному составу совокупность калибров, обеспечивающая получение n различных по размеру чистовых профилей (где $n \geq 2$); например, четверичная гибкая минисистема овал - круг - овал - круг позволяет получить два смежных по диаметру товарных круга из круглой исходной заготовки, четверичная система плоский калибр - ребровой овал - овал - круг при надлежащей

настройке первых трех калибров позволяет получать в соответствующих чистовых калибрах не менее двух чистовых кругов смежных диаметров из квадратной или круглой исходной заготовки.

2.1.1. Общие принципы универсализации калибровки валков применительно к стану с двухвалковыми калибрами при прокатке по принципу «в каждом калибре - один проход».

Гибкая (универсальная) калибровка - это система калибров, позволяющая получать различные конечные профили без перевалки валков.

Варианты гибкого перехода с профиля на профиль таковы.

Вариант 1. Осуществляется перенастройка всех калибров гибкой минисистемы. Пример дает минисистема ромб - квадрат, позволяющая прокатывать ряд более или менее четко оформленных чистовых квадратов. Естественно, что диапазон регулирования по варианту 1 узок (получаются профили лишь весьма близких размеров).

Вариант 2. В качестве чистового используется один из промежуточных калибров; следующие за ним калибры выводятся из работы. Вариант 2 применяется, когда калибровка представляет собой совокупность однотипных минисистем калибров; например, многократно повторяющаяся минисистема овал - круг позволяет, заканчивая прокатку в любом из круглых калибров, получать в качестве конечных различные круглые профили.

Вариант 3. В качестве чистового используется вновь вводимый калибр, причем предшествующие калибры перестраиваются на измененный режим обжатий (вытяжек). Примеры дают минисистема квадрат - плоский калибр - ребровой овал - овал - круг, позволяющая получать чистовые круги в широком диапазоне диаметров (рис. 2.1, а), и аналогичная минисистема квадрат - плоский калибр - слабо заполненный круг - плоский калибр - круг (рис. 2.1, б) [4]. Частный случай варианта 3: при переходе с меньшего профиля на больший некоторые из предшествующих калибров выводятся из работы и содержащие их клетки функционируют в транспортном режиме. Так, в рамках минисистем, представленных на рис. 2.1, при соответствующей замене чистового калибра можно использовать в качестве предчистового не только второй, но и третий с конца калибр (пропуская второй) или четвертый с конца (пропуская второй и третий).

Современный опыт использования непрерывных и полунепрерывных станов в режиме многосортamentной прокатки позволяет сформулировать следующие требования к калибровкам прокатных валков таких станов.

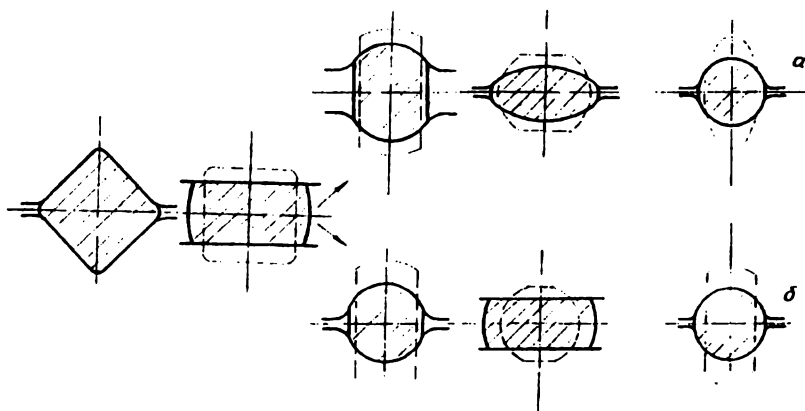


Рис.2.1. Система калибров для прокатки прутков в широком сорimente (а) и ее модифицированный вариант (б)

1. В головной части стана желательно использовать системы калибров, сочетающие технологическую гибкость (т.е. максимальную универсальность) и высокую вытяжную способность с надежностью в работе.

2. Для всех проходов, включая чистовые, желательно обеспечивать возможность достаточно широкого регулирования степени заполнения калибров. Это требование является следствием обстоятельств, типичных для заводов ОЦМ: горячекатаные заготовки практически всегда подвергаются дальнейшей доводке волочением на готовые размеры, и поэтому целесообразно получать с использованием одного комплекта калибров ряд близких размеров заготовки. Сходная ситуация возникает при прокатке профилей из черных металлов в случае применения установленного за чистовой клетью блока горячего калибрования.

3. Разработка калибровки по стану в целом должна быть подчинена принципу наибольшей ее гибкости и, в частности, отвечать следующим требованиям:

- простота изготовления и переточки калибров;
- простота и надежность валковой арматуры;
- простота перехода с профиля на профиль.

Современный опыт свидетельствует, что этого можно достичь за счет использования для черновой и подготовительной прокатки калибров со слабовыраженными ручьями, а также калибров с низкой степенью заполнения. В частности, полезны и перспективны следующие варианты повышения гибкости калибровок.

2.1.2. Первый подход к повышению гибкости калибровок - широкое использование плоских калибров.

Предельным случаем такого рода (вариант А) является описанный в [5] и во многих других публикациях RER - процесс, который применяется на ряде зарубежных станов. Он заключается в том, что все проходы, кроме одного - двух последних, делаются только в плоских калибрах (рис.2.2,а). RER - процесс можно квалифицировать как полный отказ (на стадии подготовительной прокатки) от ручьевых калибров. Достижимое при этом повышение гибкости связано с определенной платой - снижением разовых обжатий и / или ужесточением требований по обеспечению устойчивости раската в ребровых проходах. В условиях отечественных станов эти особенности послужили препятствием к широкому внедрению RER - процесса.

Более приемлемым оказался частичный отказ от ручьевых калибров в варианте Б, согласно которому многократно используется минисистема калибров плоский калибр - круг (рис.2.2,б). Этот вариант освоен авторами применительно к производству весьма широкого сортамента круглых и полосовых профилей из медных сплавов электротехнического назначения [6].

Достигнутый успех подтолкнул авторов к изысканию вариантов, смежных с вариантом Б. Эксперименты и теоретический анализ показали, что в рамках подготовительной прокатки удачен вариант В - многократное использование сочетания калибров ромб - плоский калибр (рис.2.2, в). В теоретическом отношении этот вариант крайне интересен тем, что заставляет четко различать понятия «система калибров» (ромб - плоский калибр) и реализуемая в этой системе «схема прокатки» (шестиугольник - шестигранник). В прикладном отношении вариант Б полезен тем, что позволяет получать шестигранный профиль, пригодный в качестве заготовки для волочения круглых профилей. Вариант прокатки в системе ромб - плоский калибр является серьезным конкурентом по отношению к патенту ГДР №280700, в котором предложено производить прокатку в калибрах минисистемы шестиугольник - ромб.

В отечественной практике примером нетрадиционного подхода в процессе принятия технологических решений может служить освоение сортамента ПНС 250 КУЗОЦМ. Заглядывая несколько вперед, отметим, что для соблюдения условий гибкого перехода при частой сменяемости профилей на этом стане были широко использованы схемы прокатки, включающие плющение заготовки в гладких валках, а именно:

- с использованием системы гладкая бочка - ребровой калибр была разработана и внедрена технология прокатки прямоугольных и клиновидных полос шириной 50...125 мм;

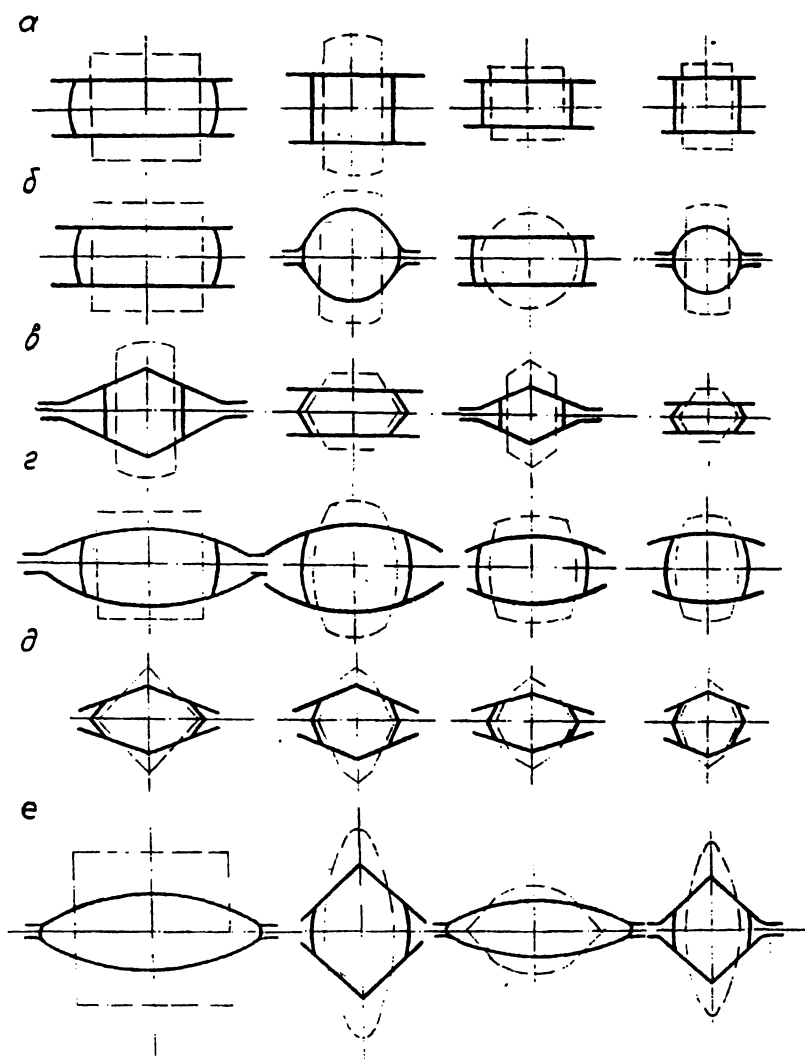


Рис.2.2. Варианты гибких калибровок

- с использованием системы гладкая бочка - круг была разработана и внедрена технология прокатки в НГ 350 круглых профилей diam. 20...30 мм, служащих промежуточными заготовками для их последующей

прокатки в НГ 300, а также технология прокатки по той же системе в НГ 300 круглого профиля диам. 14 мм, предназначенного для получения в НГ 250 катанки диам. 8 мм;

- было применено плющение круглых промежуточных заготовок в гладких валках НГ 300 для получения полос шириной 30...50 мм.

2.1.3. Второй подход к повышению гибкости - использование ручьевых калибров с низкой степенью заполнения

Первое из решений такого рода – вариант Г (патент ФРГ №1282582, патент Англии №1081950)- использование для подготовительной прокатки калибров системы овал - овал со степенью их заполнения порядка 65 % (рис.2.2,г), т.е. в режиме, приближенном к RER - процессу. Применяются овалы со сравнительно небольшими радиусами; конфигурация свободной поверхности незаполненного овала такова, что раскат хорошо центрируется в следующем калибре и устойчив в нем.

Смежный с вариантом Г вариант Д - прокатка в калибрах ромб - ромб с существенным незаполнением (рис. 2. 2, д). Реализуемая при этом схема прокатки такова: квадрат высокой степени заполнения из ящичного или же квадратного калибра - неправильный восьмиугольник - восьмиугольник (в случае необходимости - правильный, т.е. восьмигранник). Правильный восьмигранник занимает промежуточное положение между квадратом и кругом, поэтому для получения аккуратного чистового квадрата или круга его можно прокатывать дальше в калибрах системы ромб - квадрат или овал -круг. Мелкие правильные восьмиугольники могут также служить заготовками для волочения квадратной или круглой проволоки.

В вариантах Г и Д реализуется отказ от полного заполнения каждого из калибров в составе двоичной минисистемы. По аналогии с вариантом Б отказ может быть лишь частичным, что приводит к своеобразным схемам, из которых наиболее перспективен вариант Е - прокатка в калибрах системы овал с высокой степенью заполнения - квадрат с преднамеренным незаполнением и с кантовкой получаемого профиля на 90° (рис. 2. 2, е). Естественно, что калибры с пониженной степенью заполнения можно конструировать как калибры, неглубоко врезанные в валки.

2.1.4. Третий подход к повышению гибкости - использование калибров с расширенными возможностями; применение силовых проводок.

В первооснове обеспечения гибкости лежит возможность перенастройки калибров с целью получения надлежащего предчистового профиля. Однако способности к четкому оформлению профиля при существенной перенастройке у открытых калибров довольно скромны. Поэтому в рамках задачи построения гибких калибровок представляю

интерес такие полуоткрытые (полузакрытые) и закрытые калибры, которые можно назвать раздвижными (рис. 2. 3). На рис. 2.3,а представлен раздвижной по ширине калибр для управления шириной гаммы полосок (а.с. 1034800 СССР), на рис. 2.3,б – калибр, раздвижной по высоте, позволяющий использовать прямоугольную, ромбическую или овальную заготовку (а. с. 1235569 СССР); на рис. 2.3,в - калибр, который допускает значительную перенастройку и по ширине, и по высоте, благодаря чему в нем можно прокатывать гамму криволинейных клиновидных профилей, подлежащих последующей разгибке. Последний вариант открывает дополнительные возможности перед производством широкого сортамента коллекторных профилей для электрических машин (а. с. 1142188 СССР). На рис. 2.3,г представлен специфический раздвижной калибр, который образован двумя имеющими конусность валками совместно с межвалковой проводкой.

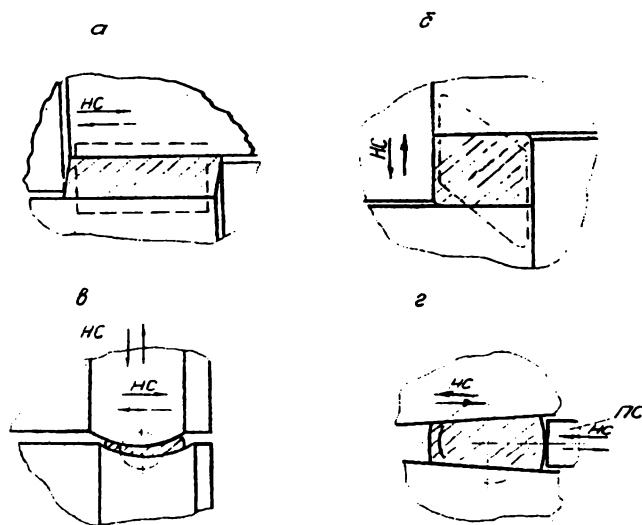


Рис.2.3. Раздвижные калибры: НС - направление смещения валков, обеспечивающее существенное изменение размеров калибра; ПС - проводка силовая

Плата за возможности, предоставляемые раздвижными калибрами, определяется необходимостью конструктивных решений по обеспечению широкой регулировки осевого положения валков (применительно к калибрам, раздвижным по ширине), по предотвращению неприятных последствий, порождаемых осевыми усилиями со стороны металла на

валки и их подшипники, а также необходимостью использовать силовые (т. е. воспринимающие значительные усилия) проводки, предотвращающие тенденцию к закручиванию полосы относительно продольной оси. Преодоление этих трудностей - путь к широкому использованию раздвижных калибров, в том числе калибров с косым расположением в валках.

Косо расположенные калибры известны давно, но в последние годы они снова вызывают пристальный интерес (авторские свидетельства СССР №741965, 1118442, 1342538, 1435329, 1524947, заявка Японии №60-187401 и др.), в частности потому, что тенденция к закручиванию полосы относительно оси может использоваться для кантовки раската, выходящего из наклонного калибра [7]. Такое сочетание прокатки с кантовкой (расширение функциональных возможностей калибра) - своеобразное повышение гибкости калибровки, уменьшающее затраты на установку валковой арматуры при переходе с профиля на профиль. Авторы данной книги с успехом реализовали эту идею в варианте косо-расположенного ребрового калибра для прокатки полос. Авторами накоплен также положительный опыт использования силовых проводок.

Внедрение силовых проводок соответствует тому фундаментальному принципу развития техники, согласно которому совершенствование каждого из устройств включает наделение его дополнительными функциями, т. е. по сути повышение его гибкости. Эта тенденция явно просматривается в разработках последних лет, которые показывают, что существует такая линия развития: проводки направляющие - силовые проводки - деформирующие проводки. В частности, уже проработаны варианты межвалковых вводных проводок, выступающих за плоскость осей валков, а также варианты проводковых систем, объединяющих вводные и выводные проводки. Такие проводки, выполняющие дополнительную функцию ограничения уширения в очаге деформации, предложены применительно к условиям RER - процесса (например, патенты США №4428217, 4685320). Аналогичным образом они могут применяться во всех случаях, когда используются слабо заполненные, а тем более - неглубоко врезанные калибры, оставляющие достаточно места для размещения ограничителей уширения в межвалковом промежутке.

Возможны модификации калибров с созданием односторонне повышенного зазора для размещения массивной межвалковой проводки (рис. 2. 3, г). При этом из круга получается профиль в виде трапеции с криволинейными основаниями, который далее прокатывается в овальном калибре - по аналогии с вариантом трапеция - овал в первом проходе непрерывного стана в составе литейно - прокатного агрегата (например, патент США №4456491).

Применительно к прокатке сортовых профилей известно предложение перед некоторыми калибрами устанавливать роликовые проводки, назначение которых - сглаживание острых углов раската (заявка Японии №56-122605). Это и подобные изобретения позволяют утверждать, что одно из перспективных направлений повышения гибкости калибровок - вовлечение в процесс деформации валковой арматуры. Естественно, что проводки могут создавать лишь небольшую (корректирующую) деформацию, однако в деле обеспечения гибкости полезны все возможные нюансы. Так, решение по заявке Японии №56-122605 может быть реализовано для выглаживания кромок листового шестиугольного профиля, получаемого в калибрах системы ромб - плоский калибр (вариант В). При этом гибкость калибровки резко возрастает: обеспечивается возможность получать заготовки под волочение не только кругов, но и полосок в широком сортаменте.

Изложенный в подразделе очерк теории построения гибких калибровок обобщает связанные с непрерывной прокаткой работы авторов и многочисленные, но разрозненные изобретения и статьи других исследователей.

2.2. Калибровка валков обжимной клетки трио 500

Как уже неоднократно отмечалось, основным отличием ПНС 250 является его нехарактерный для непрерывных станов широкий сортамент. Специфика завода ОЦМ обуславливает другое существенное отличие режима работы стана: небольшой тоннаж партий металла, не превышающей для ряда заказов 20 т. Эти особенности привели к разработке схем прокатки, обладающих значительной технологической гибкостью.

Мелкий сорт из медных сплавов получают, как правило, прокаткой на специализированных линейных станах с использованием калибровок: для кругов - системы овал-квадрат с овальным предчистовым и круглым чистовым калибрами; для полос - системы из прямоугольных калибров или той же калибровки овал-квадрат в сочетании с гладкой бочкой и ребровым калибрами. Применение таких систем для работающего в режиме частых переходов непрерывного стана явно нецелесообразно, поскольку требует значительного числа разных калибров и соответствующей валковой арматуры, трудоемкой их настройки при смене прокатываемого профиля. Для ПНС 250 потребовалась и была осуществлена разработка калибровок для получения промежуточных заготовок из обжимной клетки, заготовок прямоугольных шин шириной от 30 до 125 мм, клиновидных заготовок для коллекторных полос, круглых

профилей диаметром от 8 до 40 мм. Применительно к полунепрерывному стану решение такой задачи являлось существенно новым, поскольку оно реализовано при отсутствии отечественных и зарубежных аналогов.

Калибровку обжимной клетки с предусмотренной проектом стана четырехпроходной прокаткой вайербарсов в ящичных калибрах разработали с учетом следующих требований.

1. Калибровка должна быть в равной мере приемлема для вайербарсов с заостренными концами массой 85 и 120 кг, отлитых наполнительным способом в горизонтальные изложницы; для слитков сечением 100х100 мм с заторцованными концами, отлитых непрерывным способом; для прессованной заготовки сечением 95х95 мм из кадмиевой бронзы БрКд1.

2. Углы захвата не должны превышать 24° для меди и 20° для БрКд1.

3. Во всех случаях из клетки должна выдаваться заготовка сечением 60х60 мм, за исключением случаев прокатки на стане полос шириной 90...125 мм, для которых с обжимной клетки должна сниматься более крупная заготовка.

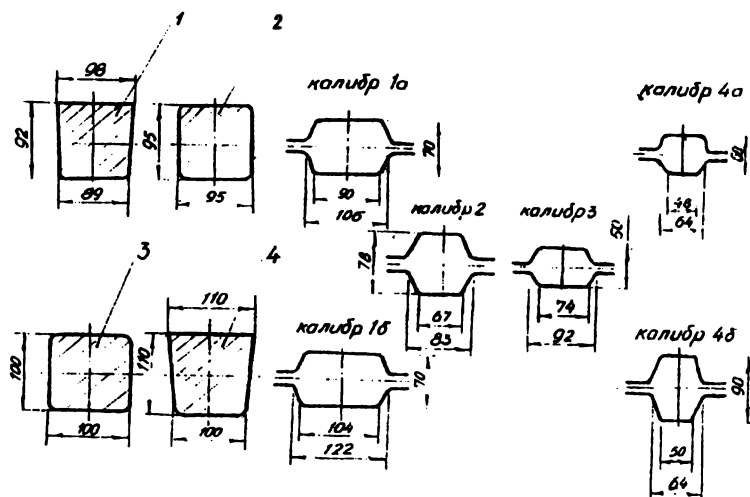


Рис.2.4. Типоразмеры поперечного сечения исходных слитков и схема калибровки ОК 500: 1,4 - медные слитки горизонтальной отливки вида СН-М1 массой 85 и 120 кг (ГОСТ 193-79); 2 - прессованная заготовка из кадмиевой бронзы; 3 - медный слиток вертикальной непрерывной отливки вида СВ-МО6 (ГОСТ 193-79)

Удовлетворяющая этим требованиям калибровка приведена на рис.2.4. Первый калибр выполнен в двух вариантах: более широкий предназначен для вайербарсов массой 120 кг и непрерывнолитных слитков 100х100 мм, другой - для заготовки 95х95 мм из БрКд1 и вайербарсов массой 85 кг. Калибры 2 и 3 унифицированы и сдублированы.

После ввода ПНС в строй действующих были выпущены значительные объемы промышленных партий медных шин, коллекторных полос, круглых прутков и катанки. В процессе прокатки не обнаружено никаких серьезных отклонений от расчетного варианта калибровки: захват раскатов во всех проходах был хорошим; заполнение калибров клетки 500 и уширение металла мало отличались от рассчитанных.

Как отмечено в подразделе 1. 2, из заготовки 60х60 мм, выдаваемой из ОК 500, удается получить полосу, согласно расчету, с максимальной шириной до 90 мм. Для получения полос шириной до 110...115 мм из более крупной заготовки реализован следующий вариант: раскат после третьего прохода прокатывается в калибре 46, на отводящем рольганге самопроизвольно кантуется и поступает к НГ 350, имея размеры 50х90 мм. Для прокатки еще более широких полос (до 120...125 мм) использовали предусмотренный для этой цели разгонный калибр, нарезанный на валках первой клетки НГ 350 (рис.2. 5). Таким образом, в ОК 500 реализована и проверена многолетней практикой схема прокатки, соответствующая требованию технологической гибкости.

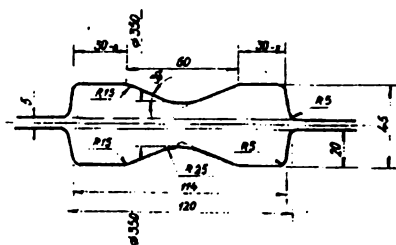


Рис.2.5. Разгонный калибр на валках клетки 1-350 для прокатки самых широких полос

В последующем была поставлена задача повысить универсальность калибровки ОК 500 и освоить прокатку заготовки из меди М1 максимально возможной массы с целью получения длинномерного бунта катанки, обеспечивающего высокую производительность волочильного оборудования. При этом процесс прокатки в обжимной клетке по-прежнему должен отвечать условию технологической гибкости: при

значительном увеличении длины и сечения слитка размеры сечений промежуточных заготовок, выдаваемых из клеток, должны оставаться прежними.

Новый вариант калибровки показан на рис.2.6, причем по сравнению с первоначальным он имеет ряд существенных отличий, рассмотренных ниже.

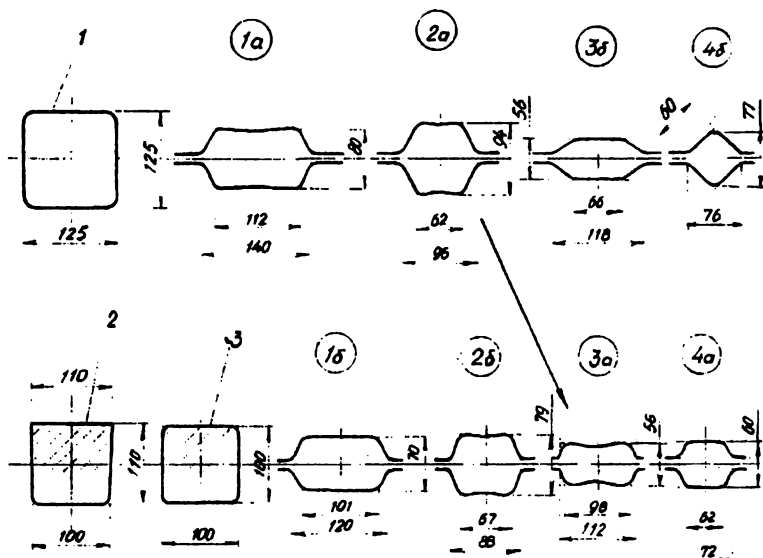


Рис.2.6. Типоразмеры поперечного сечения исходных слитков и схема калибровки ОК 500 для прокатки медного слитка максимально возможной массы:

1 - слиток собственного производства вертикальной отливки;
2 - слиток вида СН-М1 массой 120 кг; 3 - слиток вертикальной отливки вида СВ-МО6

1. Максимальное поперечное сечение слитка для прокатки в ОК 500 принято на уровне 125x125 мм, при этом угол захвата на переточенных валках может достигать 27°. Приемлемость такого значения угла захвата может быть оправдана как многолетним практическим опытом прокатки медных вайербаров (в частности, в обжимной клетки трио 500 стана 250 Пермского завода «Камкабель», где угол захвата - до 31...32°, а также в обжимной клетки допель-дуо 440 линейного стана Каменск-Уральского завода ОЦМ, где угол захвата - до 26°40'), так и имеющимися в литературе сведениями, согласно которым углы захвата при горячей прокатке меди составляют от 24...25° (на валках с развитой

сеткой разгара) до 28...29° (на валках с налипшим металлом) [8]. Широкий диапазон предельных углов захвата в зависимости от состояния поверхности валков представлен в [9]: от 24...25 до 33...34°. Тем не менее для обеспечения стабильного захвата и устойчивого протекания процесса прокатки режим обжатий в ОК 500 рассчитан таким образом, чтобы прокатка проходила с защемлением металла в калибрах; на соответствующем уровне назначены и выпуски калибров.

2. Во избежание возможного (вследствие колебаний условий прокатки) переполнения калибров, ручки выполнены с некоторой выпуклостью по дну, обеспечивающей вогнутость обращенных в стороны боковых граней раскатов после их кантовки на 90°.

3. С целью получения из ОК 500 более точной по размерам промежуточной заготовки сечением 60х60 мм в новом варианте калибровки предусмотрена дополнительная схема прокатки с участием минисистемы шестиугольник -квадрат (калибры 3 Б и 4 Б, рис. 2.6).

4. В монтажную схему калибров ОК 500 с учетом нового варианта калибровки и возможной реализации дополнительной схемы прокатки (показанной на рис. 2.6 стрелкой) также внесены соответствующие изменения.

2.3. Технологическая схема прокатки прямоугольных и клиновидных полос в непрерывных группах 350 и 300

2.3.1. Выбор режима прокатки клиновидного профиля

Процесс прокатки клиновидной заготовки включает в себя следующие стадии: подготовительную (формирование прямоугольной заготовки), предчистовую (формирование клина из прямоугольника) и чистовую (получение готового клиновидного профиля из клиновидной заготовки).

Режим прокатки клиновидного профиля должен обеспечивать получение высококачественной заготовки при наиболее полном использовании возможностей механического и энергетического оборудования стана -клетей и их приводов. Считается целесообразным вести горячую прокатку с такими обжатиями, которые максимально допустимы по условиям захвата, пластичности металла, прочности элементов стана, по условиям работы главных приводных двигателей.

Режим горячей прокатки, ориентированный на максимально высокие обжатия в каждом отдельном проходе, позволяет оптимальным образом использовать технологические свойства нагретого металла. При интенсивных обжатиях и соответственно уменьшенном количестве проходов заготовка в процессе прокатки меньше остывает, тепло

пластической деформации используется лучше, и температурный интервал прокатки сужается, что обеспечивает дополнительные технологические преимущества.

В каждом отдельном проходе в качестве существенного ограничения обычно выступает лишь один из вышеперечисленных факторов, ограничивающих режим обжатий при горячей прокатке. Последовательность срабатывания основных ограничений по ходу прокатки от первого прохода к последнему, как правило, такова: ограничение по пластичности исходной заготовки; ограничение по углу захвата; ограничение по максимальному моменту на валу двигателя; ограничение по усилию прокатки; ограничение, связанное с необходимостью получить ровную полосу.

На ПНС 250 стремление обеспечить максимально большие обжатия в каждом отдельном проходе сталкивается с противоположной тенденцией, порождаемой целью равномерно загрузить клетки всего стана (например, при прокатке катанки) или, по крайней мере, клетки включенных в работу отдельных НГ стана. Однако в пределах предчистовой прокатки клина принцип максимально интенсивных обжатий остается предпочтительным в силу следующих причин:

1) чем интенсивнее обжатия при формировании клина, тем меньше проходов требуется для предчистовой и чистовой прокатки и тем меньше количество комплектов специализированных валков, предназначенных для прокатки собственно клина;

2) чем больше обжатие за проход, тем ближе ситуация в очаге деформации к выполнению условия ровного входа полосы в валки (этот и два последующих тезиса основательно подтверждены далее данными теоретического анализа и проверены опытом);

3) чем больше обжатие за проход, тем слабее выражена тенденция к серпению полосы и тем меньше возможный изгиб полосы в горизонтальной плоскости;

4) чем больше обжатие за проход, тем ближе ситуация в очаге деформации к выполнению условия естественного обеспечения ровного выхода полосы из валков.

Концепция, в некоторой степени противоположная принципу интенсификации обжатий, связана со следующими обстоятельствами:

1) повышенные обжатия ускоряют износ валков и ухудшают качество их поверхности, что, однако, не столь существенно, так как получаемый профиль не является товарной продукцией, а служит заготовкой под последующее волочение;

2) повышенное обжатие, хотя и снижает тенденцию к серпению, может быть связано с повышенным давлением полосы на проводки, для компенсации которого должны быть предприняты соответствующие меры.

В конечном итоге, выбирая режим обжатий для проходов, в которых идет формирование клина, целесообразно стремиться к максимальной интенсивности обжатий, т. е. к минимальному числу таких проходов.

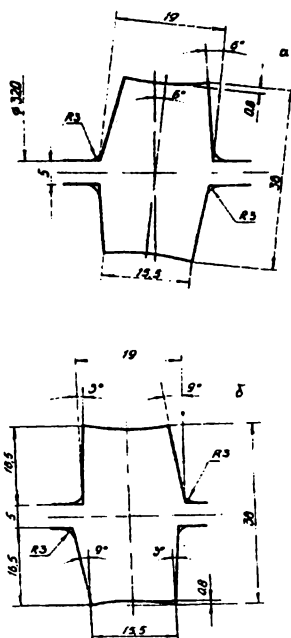
2.3.2. Калибровка валков для прокатки полосовых профилей

При разработке калибровки валков для прокатки полос стремились к созданию такой схемы, которая позволяла бы быстро и без длительной настройки переходить с одной позиции сортамента на другую при небольшом числе комплектов валков и их компоновок и требовала бы минимума простой проводковой арматуры. Наиболее полно этим условиям соответствует разработанная для непрерывных групп стана калибровка, основанная на сочетании прокатки на гладкой бочке и в ребровых калибрах. Оптимальный эффект такой калибровки достигается на станах, у которых горизонтальные клетки чередуются с вертикальными, - в этом случае процесс прокатки и валковая арматура предельно просты. На ПНС 250 в НГ 350 и 300 нет вертикальных клеток, сравнимых с горизонтальными, поскольку так называемые кромочные клетки в расчет приняты быть не могут по причине их слабости и малой мощности привода. Поэтому согласно предложенной технологической схеме раскат после двух проходов на гладкой бочке должен кантоваться имеющимися в составе НГ 350 валковыми кантователями на ребро и прокатываться в одном из трех ребровых калибров, затем следует кантовка на пласт высоких полос, выходящих из ребровых калибров, осуществляемая в кантующих калибрах (рис. 1. 2). В этих условиях схема гладкая бочка-ребровой калибр-гладкая бочка не утрачивает своей предпочтительности перед другими возможными вариантами.

Все сказанное выше относится к так называемым широким полосам ($B=60...125$ мм), прокатка которых должна заканчиваться в НГ 350, а уборка осуществляется «в концах», т. е. поштучно.

При разработке технологии прокатки заготовок узких шин ($B=30...60$ мм), прокатка которых должна заканчиваться в НГ 300 с уборкой в бунтах, был проведен анализ сортамента полос мелких сечений с общим числом позиций, равным 62, заготовки для которых получают на старом линейном стане. С учетом экономической целесообразности перевода изготовления горячекатаных заготовок на ПНС 250 из общего числа позиций выбраны те, объем заказов которых составляет после объединения объемов близких по размерам позиций полос не менее 40 т в год. При расчете калибровок и режимов прокатки этой группы полос

Для исправления указанного положения на валках клетки 2-300 были нарезаны ребровые калибры с возможностью регулировки их по высоте до 12 мм. С целью упрощения кантовки полос из ребрового положения в пластовое (при отсутствии в комплекте арматуры стана специальных кантующих коробок) ребровой калибр дополнительно наделили функцией кантующего, и для этого разработали два варианта его исполнения (рис. 2.7). Согласно первому ось ребрового калибра наклонена к вертикали под углом 6° (рис. 2.7. а), по другому варианту ось калибра наклона не имеет, но предусмотрены различные значения



46

выпусков у каждого из ручьев калибра - по 3 и 9° (рис. 2.7, б). Дно ручьев всех ребровых калибров выполнено выпуклым, чтобы чистовой горячекатаный профиль имел плоские боковые грани.

Последующая прокатка промышленных партий заготовок медных шин показала следующее:

- ребровой калибр первого варианта исполнения надежно кантует полосу из ребрового положения в пластовое;
- при использовании ребрового калибра, выполненного по второму варианту, кантовка осуществляется менее надежно, т. е. нестабильно;
- полученный профиль имеет хорошо оформленные плоские боковые грани и достаточно точный размер по ширине.

При анализе портфеля заказов узких коллекторных полос из БрКд1 с целью организации производства их заготовок на ПНС 250 (с учетом близости размерного сортамента заготовок медных шин) выбрано двенадцать позиций коллекторных полос шириной 24...57 мм. В зависимости от ширины они разделены на три группы (табл. 2. 1), имеют соответствующие аналоги из числа заготовок медных шин и прокатываются из промежуточных кругов тех же размеров с небольшой (на уровне 1...2 мм) подстройкой последних.

Таблица 2.1

Заготовки коллекторных полос из БрКд1

Группа	Размеры поперечного сечения, мм		Диаметр промежуточного круга, мм	Общий коэффициент вытяжки от круга до чистового профиля
	заготовок коллекторных полос из БрКд1	аналогов из числа заготовок медных шин		
1	7x57	10x53	42	3,47
	7x50	7x50	40	3,59
			35	2,75
2	10x43	12x43	35	2,24
	8x43	8x43	33	2,49
	6x43	7x43	32	3,12
	8x40	7x43	32	2,51
	6x40	7x43	30	2,94
	10x38	12x43	33	2,25
	8x38	8x43	31	2,48
	6x38	7x43	29	2,90
3	6x32		22,5	2,07
	6x24		18,5	1,86

Таким образом, технологическая схема прокатки заготовок коллекторных полос принципиально не отличается от схемы прокатки заготовок медных шин, согласно которой клеть 3-300 работает в транзитном режиме, а все ребровые проходы осуществляются в калибрах шириной 10(или 11) и 15 мм. Некоторые особенности режимов прокатки этих трех групп полос таковы.

1. Для полос первой группы 7х57 и 7х50 мм рассчитано по два варианта режимов прокатки (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Ребровые проходы при прокатке полос 7х57 и 7х50 мм

Размер проката из клетки 4-300, мм	Диаметр промежуточного круга из клетки 2-350, мм	Размеры полосы после ребрового прохода в клетке 2-300, мм	Коэффициенты при прокатке в ребровом проходе		Примечания
			Обжатия	Вытяжки	
7х57	42	54х10 50х15	1,17 1,10	1,13 1,06	Клеть 3-300 – рабочая
7х50	40	47х10	1,24	1,20	Клеть 3-300 – транзитная; круг 35 мм получен в клетке 4-350
	35		1,12	1,09	

Окончательное решение в пользу того или иного варианта должно приниматься по результатам практической прокатки. Ее необходимо проводить с отрезкой летучими ножницами переднего конца полосы, выходящей из НГ 350, из-за склонности к растрескиванию концов меднокадмиевого раската - вследствие пониженной пластичности сплава и заторцованных концов поступающей на стан заготовки.

2. Для второй группы полос (см.табл. 2.1) промежуточные круглые профили получают за счет регулирования рабочих зазоров лишь двух круглых калибров diam. 30 и 35 мм, т. е. принцип универсальности калибровки здесь не нарушен. Согласно схеме для заготовок размерами 10х43 и 10х38 мм предназначен ребровой калибр шириной 15мм, для всех остальных полос этой группы используется ребровой калибр шириной 10 (или 11) мм с регулированием его высоты в диапазоне 33...40 мм. Коэффициент

обжатия при прокатке в этих калибрах находится в диапазоне 1,15...1,23, причем верхний предел легко может быть снижен за счет перехода к ближайшему кругу меньшего диаметра.

3. Самые мелкие в сортаменте стана полосы третьей группы с размерами 6х32 и 6х24 мм получают плющением круглых профилей диам. 22,5 и 18,5 мм, прокатываемых в калибрах диам. 20,5 и 17 мм с зазором, увеличенным по сравнению с номинальным.

За счет применения технологической схемы, предусматривающей плющение круглых профилей (предназначенных для получения катанки) и использование ребровых калибров, без затруднений можно производить весь сортамент узких заготовок медных шин и коллекторных полос шириной 24...57 мм, снимаемых с НГ 300 и убираемых бунтовым способом. Такая схема в полной мере отвечает требованию технологической гибкости.

Для прокатки клиновидных полос, число которых в сортаменте составляет несколько десятков, проектом на стане предусмотрены специальные клетки с наклоняющимися коническими валками, позволяющими получать полосы с углом профиля до 8°. Эти клетки могут устанавливаться на последние места в НГ 350 и 300.

Хорошо известно, что при формировании клина из заготовки прямоугольного сечения неравномерная деформация по ширине полосы порождает стремление заготовки к поперечному смещению в сторону толстой кромки полосы и серповидность последней из-за преобладания вытяжки по тонкой кромке. Поэтому формирование за один проход из заготовки прямоугольного сечения клиновидной полосы без серповидности или волнистости практически неосуществимо. Передача такой дефектной полосы на значительное расстояние к ножницам, транспортерам и моталкам сильно затруднена. Формирование полосы клиновидного сечения первоначально было предложено осуществлять в двух клетях: в упомянутой специальной (чистой) и в предшествующей ей предчистой клетке, на валках которой нарезан ряд клиновидных калибров с различными углами наклона (рис. 2. 8). В этой предчистой клетке, оборудованной жесткими (по существу - силовыми) направляющими проводками, относительно толстая и достаточно горячая прямоугольная полоса прокатывается на клин с большим обжатием⁵, смягчающим влияние неравномерности деформации по ширине. Угол клиновидного калибра предчистой клетки и величина обжатия в чистой клетке подбираются так, чтобы в чистой клетке полоса

⁵ Рекомендация основана на результатах теоретического и экспериментального исследования, изложенных в 3 - м разделе.

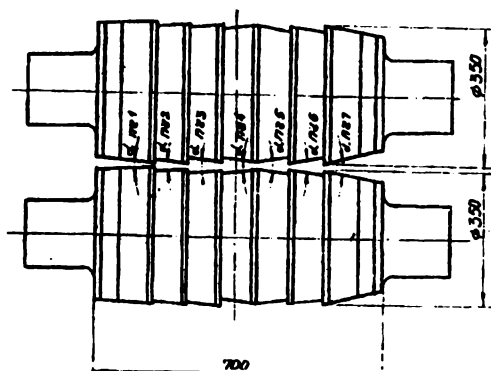


Рис.2.8. Валки предчистовой клетки с клиновидными калибрами, имеющими различные углы

прокатывалась с равномерным обжатием по ширине - в этом случае можно гарантировать прямолинейность полученного клиновидного профиля и его нормальную доставку к последующим агрегатам.

Была разработана и рекомендована к внедрению следующая технологическая схема производства заготовок коллекторных полос шириной 80...100 мм. Прессованная заготовка квадратного поперечного сечения 95х95 мм прокатывается в ОК трио 500 на прямоугольную полосу с размерами 50х90 мм, которая затем в шести клетях НГ 350 раскатывается на гладкой бочке и в ребровых калибрах до необходимого размера. Отношение сторон b/h прямоугольной полосы, задаваемой в предчистовую седьмую клеть с калибром клиновидной формы, не должно превышать 5...6.

Вытяжку в седьмой клетке рекомендуется выдерживать на уровне 1,6...1,8, чтобы в соответствии с опытными и теоретическими данными обеспечить высокую степень деформации в этом проходе, причем с увеличением угла формируемого профиля вытяжка должна расти. В чистовой клетке вытяжка должна составлять 1,2...1,4.

Последующая практика освоения прокатки клиновидных профилей показала, что оптимальным с позиций обеспечения качества проката и гибкости технологии, снижения трудоемкости при переточках валков и их перевалках является вариант, при котором формирование клиновидного профиля проводится в трех последних клетях НГ 350, оборудованных жесткими проводками, предотвращающими поперечное смещение и серпение раската. С учетом вышесказанного от установки на линию прокатки специальной клетки с наклоняющимися коническими валками отказались.

2.4. Калибровка валков для прокатки круглых прутков и катанки

Для прокатки круглых прутков и катанки было решено использовать систему круг-гладкая бочка-круг. Опыты по прокатке свинцовых образцов, проведенные на лабораторном стане 200, и по прокатке титановых прутков на промышленном стане 450 одного из заводов показали, что эта калибровка вполне работоспособна и может быть применена в промышленных условиях. При прокатке круглого прутка в гладких валках поперечное сечение раската оказалось по форме близким к профилю, получаемому из плоскооувального калибра, и его последующая прокатка в круглом калибре проходила устойчиво.

Основные преимущества системы круг-гладкая бочка-круг перед другими системами для получения кругов предопределяются высоким уровнем ее технологической гибкости, а именно: простотой изготовления и настройки валков и валковой арматуры; повышением стойкости валков и упрощением их изготовления, так как за счет поперечного перемещения клетей достигается широкое использование участков валков с гладкой бочкой; универсальностью (гибкостью) системы, т.е. с ее помощью можно без перевалок прокатать на одном комплекте валков весь сортамент кругов, используя каждый круглый калибр и как промежуточный вытяжной, и как чистовой.

При разработке технологической схемы прокатки медной катанки diam. 8 мм представлялось целесообразным использовать нарезанные в НГ 350 и 300 калибры системы круг-гладкая бочка-круг и применить ту же систему в НГ 250, но с одним видоизменением: выполнять предчистовой проход не на гладкой бочке, а в однорадиусном овальном калибре.

Последующая прокатка промышленных партий металла показала, что более стабильно процесс прокатки катанки проходит при использовании в НГ 250 системы калибров овал-ребровой овал-овал-круг, известной тем, что она обеспечивает плавное изменение формы сечений полос по проходам при высоком качестве поверхности проката, устойчивость раскатов в калибрах, повышенную точность готового профиля и пониженный износ валков. Важнейшим обстоятельством является также то, что при этом варианте были задействованы только две пары клетей НГ 250, и за счет этого удалось значительно увеличить межклетевой промежуток, использовав его для создания петли металла, крайне необходимой при отсутствии на стане САРН.

Был также рассмотрен дополнительный вариант, суть которого сводится к следующему: заменить во всех НГ стана систему круг-гладкая бочка-круг калибровкой с повышенной вытяжной способностью

(соответственно - с пониженным уширением), уменьшив за счет этого число работающих клетей с 18 до 12 и исключив 4 клетки НГ 350. Применительно к этому варианту система должна была содержать калибры, существенно ограничивающие уширение, чтобы при отсутствии на стане САРН стабильность ширины полос обеспечивать формой самих калибров. Рассматривались системы калибров овал-квадрат, шестиугольник-квадрат, ромб-квадрат. Первая из них, как известно, давно освоена на ПНС 250 завода «Камкабель» для получения медной катанки diam. 8 мм.

Очевидно, что этот вариант интенсивной калибровки вступает в противоречие с принципом универсальности калибровки в целом по стану, ориентированной на технологическую гибкость, так как достоинства варианта ограничиваются рамками производства катанки. Достоинства же таковы: повышение точности катанки до требований первого - второго классов по ТУ; как следствие - увеличение выхода годного (подразумевается устойчивый процесс прокатки по дополнительному варианту, предусматривающему интенсивную калибровку). По мере нарастания объемов выпуска катанки появляется смысл иметь для ее прокатки отдельный комплект валков НГ 350 и 300 с соответствующими калибрами, сохранив принцип универсальности для остального сортамента стана.

Подробное изложение процесса освоения прокатки медной катанки и его результатов приведено в четвертом разделе книги.

1. Рассмотрены общие принципы универсализации калибровок и три конкретных подхода к повышению их гибкости: 1) широкое применение плоских (безручьевых) калибров; 2) использование ручьевых калибров с низкой степенью заполнения; 3) применение раздвижных калибров в сочетании с силовыми проводками.

2. Разработана калибровка валков обжимной клетки, удовлетворяющая условию технологической гибкости, а именно: она позволяет, прокатывая в клетки медные вайербарсы наполнительного (разных сечений) и непрерывного литья, меднокадмиевую прессованную заготовку и медные непрерывнолитые слитки собственного производства, получать промежуточные заготовки, которые полностью покрывают потребность в выпуске непрерывными группами стана разнообразного проката.

3. Для всех групп профилей из сортамента стана - прямоугольных, клиновидных, круглых и катанки разработаны калибровки, удовлетворяющие поставленному условию: обеспечить гибкую прокатку полуфабрикатов многочисленных типоразмеров, выпускаемых малотоннажными партиями, с минимальными перевалками и наладками и использованием простой проводковой арматуры.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МЕДИ И КАДМИЕВОЙ БРОНЗЫ

3.1. Формоизменение при прокате заготовок прямоугольных и клиновидных профилей

В процессе освоения на ПНС 250 в широких масштабах горячей прокатки прямоугольных и клиновидных заготовок для волочения шин и коллекторных полос возникла задача определения формоизменения полосы с учетом влияния межклетевого натяжения и свойств металла при температурах горячей прокатки.

Наиболее типичным вариантом предчистовой и чистовой прокатки заготовок медных шин является их пластовая прокатка из прямоугольной заготовки в гладких валках со свободным уширением. Для пластовой прокатки при ширине заготовки, существенно большей ее толщины, и умеренном обжатии за проход (не более 50%) достаточен излагаемый ниже весьма простой подход к определению уширения.

На рис. 3.1 приведена схема прокатки прямоугольной заготовки и показаны характерные площади: S_{xz} - площадь проекции на вертикально-продольную плоскость смещенного по высоте объема металла; S_{yz} - площадь, смещенная в уширение, то есть ушедшая в ширину доля площади проекции на вертикально-поперечную плоскость смещенного по высоте объема металла. В условиях этой схемы

$$S_{yz}/S_{xz}=K,$$

где K - коэффициент, подлежащий определению из дополнительных соображений.

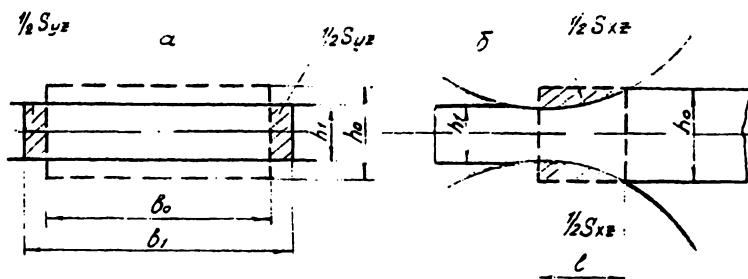


Рис.3.1. Схема простого случая прокатки:
а - фронтальный вид; б - вид сбоку

Из рис. 3.1 следует

$$S_{\pi}=h_1\Delta b; S_{\pi}=\frac{2}{3}l\Delta h,$$

т.е.

$$\Delta b/\Delta h=\frac{2}{3}K\frac{l}{h_1}, \quad (3.1)$$

где Δb и Δh - абсолютные уширение и обжатие;

l - длина очага деформации;

h_1 - толщина полосы после прохода.

При соответствующем определении коэффициента K соотношение (3.1) позволяет получить ряд формул, известных из литературы (табл. 3.1, в которой введены обозначения: h_0 - начальная толщина полосы; γ - нейтральный угол; α - угол захвата; μ - коэффициент трения; R - радиус валков; σ_0 - напряжение заднего натяжения; τ_s - предел текучести прокатываемого металла на сдвиг).

Для прокатки заготовок медных шин оказалась наиболее подходящей формула по четвертому варианту табл. 3.1 в следующей конкретизированной записи:

$$\Delta b/\Delta h=(0,4...0,45)\frac{l}{h_1}\left[1-\left(\frac{0,25}{l/b_0}+\frac{\sigma_0}{\tau_s}\right)\sqrt{0,75l/b_0}\right], \quad (3.2)$$

где учтено, что по экспериментальным данным для меди и ее сплавов $a=0,8...0,9$.

Сортамент коллекторных полос насчитывает сотни позиций, в связи с чем производство клиновидных заготовок должно отвечать требованиям технологической гибкости (легко перестраиваться с профиля на профиль), что достигается при их пластовой прокатке в наклонных цилиндрических или слабokonических валках за счет перекося осей валков в вертикальной плоскости.

Прокатка клина рассматривается в работах [10-16], но в них не обсуждается вопрос об уширении. Однако гибкая технология прокатки, связанная со свободным уширением, требует тщательного его учета и, особенно, - такой дифференциальной характеристики как неравномерность распределения уширения по кромкам полосы, проявляющаяся даже при малой клиновидности получаемого профиля.

Таблица 3.1

Варианты определения К в формуле уширения (3.1)

Вариант	Определение К и дополнительные соотношения	Получаемая формула и её автор
1	$K = h_1 / 2h_0$	$\Delta b / \Delta h = \frac{1}{3} \frac{l}{h_0}$ (Э.Эйбель)
2	$K = \frac{\sqrt{3}h_1}{h_0} \cdot \frac{\gamma}{\alpha}$ <small>где, по формуле Эжелунда-Павлова,</small> $\gamma / \alpha = \frac{1}{2} (1 - \frac{\alpha}{2\mu})$, <small>причем</small> $\alpha = \sqrt{\Delta h / R} = \frac{\Delta h}{\sqrt{R\Delta h}} = \frac{\Delta h}{l}$	$\Delta b / \Delta h = \frac{1}{\sqrt{3}h_0} (\sqrt{\Delta h R} \cdot \Delta h / 2\mu) =$ $= \frac{1,15}{2h_0} (\sqrt{\Delta h R} \cdot \Delta h / 2\mu)$ (Б.П.Бахтинов)
3	$K = \sqrt{3}C_s \frac{\gamma}{\alpha} (1 - \sigma / \tau_s)$, <small>где C_s - коэффициент влияния ширины, причем</small> $\Delta h / h_1 \approx \ln h_0 / h_1$	$\Delta b = 0,58 C_s (1 - \frac{\sigma_s}{\tau_s}) (\sqrt{\Delta h R} \cdot \frac{\Delta h}{2\mu}) \ln \frac{h_0}{h_1}$ (А.Н.Целиков)
4	$K = \frac{4}{3} a \left[1 - \left(\frac{b_0}{4l} + \frac{\sigma_s}{\tau_s} \right) \sqrt{\frac{3l}{4b_0}} \right]$ <small>где а - коэффициент свойств прокатываемого металла</small>	$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{a}{2} \frac{l}{h_1} \left[1 - \left(\frac{0,25}{l/b_0} + \frac{\sigma_s}{\tau_s} \right) \sqrt{0,75 l / b_0} \right]$ <small>- формула, полученная авторами применительно к умеренному коэффициенту трения</small>

Применительно к интегральным характеристикам формоизменения (вытяжке, уширению) справедлив известный в системотологии принцип близости, утверждающий адекватность результата и действия в системе, которая находится в состоянии, далеком от потери устойчивости: малая причина вызывает малое следствие. Конкретно, малые отклонения в условиях прокатки порождают лишь малые отклонения интегральных характеристик формоизменения.

Рассмотрим процесс пластовой прокатки клиновидного профиля с углом клиновидности δ_1 из клиновидной (в частном случае - прямоугольной) заготовки с углом клиновидности δ_0 (рис. 3.2). Поскольку $\delta_0 > \delta_1$ и в соответствии с сортаментом подлежащих прокатке клиновидных профилей углы δ_1 малы (редко превышают 6...8°), то из принципа близости следует: с целью определения интегральных характеристик процесса прокатки клиновидного профиля можно с успехом использовать формулы, полученные для простого случая прокатки. Это согласуется с выводом

в [17]. Многочисленные опыты по прокатке клиновидного профиля из прямоугольной заготовки, выполненные наряду с опытами по прокатке

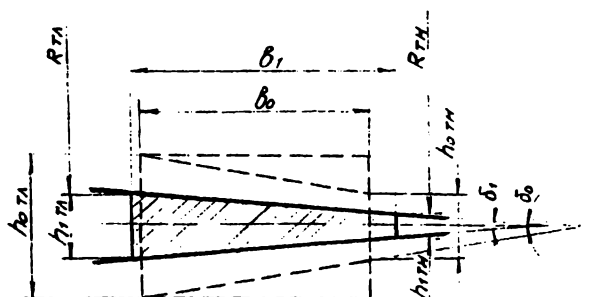


Рис.3.2. Схема прокатки клиновидного профиля из клиновидной или прямоугольной заготовки

прямоугольной полосы из прямоугольной заготовки, подтвердили, что в сопоставимых условиях коэффициент вытяжки при прокате клина практически не отличается от коэффициента вытяжки при прокатке прямоугольника. Поэтому для прокатки клина можно использовать формулу (3.2), понимая под l среднюю длину очага деформации, а под h_1 - соответствующую ширине исходной заготовки b_0 среднюю высоту h_{1cp} межвалковой щели на выходе из валков. Более корректна формула

$$\Delta b / \Delta h_{cp} = (0,4 \dots 0,45) \frac{l_{cp}}{h_{1cp}} \left[1 - \left(\frac{0,25}{l_{cp}/b_0} + \frac{\sigma_s}{\tau_s} \right) \sqrt{0,75 l_{cp}/b_0} \right], \quad (3.3)$$

где l_{cp} - длина очага деформации по тонкой кромке полосы;

$\Delta h_{cp} = h_{ocp} - h_{1cp}$;

h_{ocp} - средняя толщина заготовки.

Учитывая высокую информативность характеристик S_{yz} и S_{xz} , используем их также для оценки соотношения между Δb_{th} и Δb_{tl} - значениями уширения по тонкой и толстой кромкам. Будем иметь

$$S_{yz}^{th} / S_{yz}^{tl} = S_{xz}^{th} / S_{xz}^{tl},$$

т.е.

$$\frac{h_{1th} \Delta b_{th}}{h_{1tl} \Delta b_{tl}} = \frac{l_{th} \Delta h_{th}}{l_{tl} \Delta h_{tl}},$$

откуда

$$\Delta b_{th} / \Delta b_{tl} = \frac{l_{th}}{l_{tl}} \cdot \frac{\Delta h_{th}}{\Delta h_{tl}} \cdot \frac{h_{1th}}{h_{1tl}}. \quad (3.4)$$

где l_{th} - длина очага деформации со стороны тонкой кромки;

l_{tl} - то же со стороны толстой кромки;

$\Delta h_{тн} = h_{отн} - h_{1тн}$; $\Delta h_{тол} = h_{отл} - h_{1тол}$;
 $h_{отн}$ и $h_{отл}$ - значения начальной толщины полосы со стороны тонкой и толстой кромок соответственно.

Здесь и далее предполагается, что заготовка не обязательно прямоугольная, так что $h_{отн}$ и $h_{отл}$ не обязательно равны. Значения $l_{тн}$ и $l_{тол}$ в формуле (3.4) определяются соотношениями

$$l_{тн} = \sqrt{\Delta h_{тн} R_{тн}}; l_{тол} = \sqrt{\Delta h_{тол} R_{тол}},$$

где $R_{тн}$ и $R_{тол}$ - радиусы вала, относящиеся к тонкой и толстой кромкам полосы соответственно;

$\Delta h_{тн}$ и $\Delta h_{тол}$ - абсолютные обжатия по этим кромкам.

В табл. 3.2 приведены некоторые результаты расчетов по предложенным выше формулам при $\sigma_0 = 0$.

Таблица 3.2

Сравнение опытного $\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{оп}$ и расчетного $\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{расч}$ показателя уширения при прокатке прямоугольных клиновидных полос

Форма поперечного сечения		Размеры поперечного сечения, мм		Сплав	$\frac{\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{оп} \left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{расч}}{\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{оп}}$
начального	конечного	начального	конечного		
Прямоугольник	Прямоугольник	50x90	30x100	Кадмиевая бронза	-14%
Прямоугольник	Прямоугольник	16,5x36	14x37	Медь М1	2 %
Прямоугольник	Клин*	19x77	12,5x16. 8x79	Кадмиевая бронза	14%
Клин	Клин	9x16x97	7,2x11x99	Кадмиевая бронза	-3%

* Размеры поперечного сечения клина указаны в виде $h_{тн} \times h_{тол} \times b$

3.2. Особенности формоизменения при асимметричной прокатке клиновидного профиля из прямоугольной и круглой заготовок

На ряде прокатных станов страны производят широкий сортамент клиновидных (трапецевидных) профилей, применяя при этом пластовую прокатку в безручьевых цилиндрических наклонных или слабokonических валках. Асимметрия обжатия по ширине клиновидной полосы порождает тенденцию металла к поперечному перемещению и изгибу (серпению) в горизонтальной плоскости прокатки. Эта тенденция подавляется посредством силовых вводной и выводной проводок. Практика показывает, что при прокатке широких и тонких профилей существует опасность потери поперечной устойчивости раската с образованием недопустимой волнистости. Для получения надежных технологических решений по прокатке клиновидных профилей важно представлять, насколько развита указанная тенденция в тех или иных конкретных условиях.

В многочисленных работах [10-16] установлено, что изгиб полосы в горизонтальной плоскости прокатки является следствием, во-первых, неравномерного обжатия по ширине полосы и, во-вторых, следствием различий в скоростях левой и правой кромок полосы. В указанных и подобных работах особенности асимметричной прокатки клиновидных профилей рассмотрены без учета влияния уширения.

Однако этот вопрос заслуживает внимания, что обосновывается следующими соображениями, которые относятся к ситуациям, когда серпение (серповидность) возникает из-за разницы вытяжек толстой и тонкой кромок клиновидной полосы. При этом естественно ожидать, что тенденцию к серпению можно ослабить уменьшением разницы в вытяжках за счет искусственного увеличения уширения. Эту разницу можно полностью ликвидировать, если построить процесс так, чтобы весь смещаемый по высоте очага деформации объем металла был направлен в уширение; тогда при отсутствии общей вытяжки будут отсутствовать и вытяжки по кромкам, т.е. будет отсутствовать и серповидность. Соотношение между вытяжкой и уширением регламентируется формой очага деформации, определяемой параметром l/b , где l - средняя длина очага деформации, b - его средняя ширина. При малом значении l/b металл предпочтительно течет в направлении вытяжки, при большом - в направлении уширения. Сказанное позволяет полагать: если прокатывать равные по площади поперечного сечения круглую и прямоугольную заготовки, то при обжатиях, эквивалентных по величине смещенной площади, круглая заготовка обуславливает меньшую в среднем ширину очага деформации и, следовательно, большее

уширение, меньшую вытяжку и меньшую серповидность. Для проверки высказанных положений и получения количественных оценок проведены следующие эксперименты.

Свинцовые образцы диам. $d=24$ мм и длиной 200...250 мм прокатывали на лабораторном стане 200 с применением в качестве рабочего инструмента полубандажей с образующей, составляющей с осью валка угол 4° . Нажимным устройством стана ось нижнего валка была перекошена относительно оси верхнего валка на 2° . Таким образом получали клиновидный профиль с углом до 10° . На входной стороне клетки со стороны толстой кромки полосы устанавливали вводную проводку. Условия эксперимента были предельными по углу поперечной клиновидности межвалковой щели (на производстве реализуются углы до 10°), что позволило получить весьма наглядные данные по влиянию уширения. После прокатки измеряли толщины тонкой $h_{тн}$ и толстой $h_{тл}$ кромок, ширину полосы по бочке b_6 и ширину контактной поверхности b_k .

Для определения радиуса кривизны на контактной поверхности полосы после прокатки наносили две прямые линии АВ и СД (рис. 3.3), нормальные к боковым кромкам полосы. Середины отрезков АВ и СД

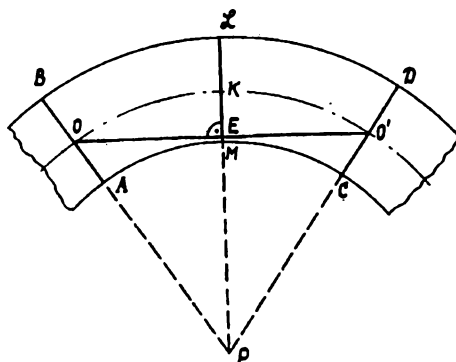


Рис.3.3. Схема к определению радиуса кривизны полосы

соединяли прямой $ОО'$ и находили середину полученного отрезка длиной l_6 - точку $Е$, из которой восстанавливали перпендикуляр; находили середину полученного отрезка $МЛ$ - точку $К$ - и на инструментальном микроскопе измеряли отрезок $КЕ$ длиной q .

Поскольку $КР=РО=R$, где R - радиус кривизны, то из треугольника $РОЕ$ находим $R^2=(R-q)^2+(l_6/2)^2$, откуда после преобразования имеем

$$R=(q^2+0.25l_6^2)/2q.$$

Для оценки степени изгиба полосы после прокатки использовали безразмерную величину - относительную кривизну заготовки d/R .

Чтобы обеспечить сопоставимость результатов по величине смещенной площади, коэффициент высотной деформации $1/\eta$ при прокатке на клин как круглой, так и прямоугольной заготовок определяли по обобщенной формуле, хорошо зарекомендовавшей себя в задачах, требующих единого описания прокатки по различным схемам:

$$1/\eta = F_0/F_1; \quad F_1 = F_0 - F_{\text{см}}, \quad (3.5)$$

где F_0 - площадь поперечного сечения заготовки до прохода;

$F_{\text{см}}$ - площадь в сечении заготовки, смещенная по высоте.

При прокатке круглой заготовки имеем $F_0 = \pi d^2/4$, а площадь F_1 (площадь фигуры АСДЕ на рис. 3.4, а) определяем как разницу между F_0 и удвоенной площадью сегмента ABC, т.е.

$$F_1 = F_0 - 2F_{\text{ABC}}, \quad (3.6)$$

где F_{ABC} вычисляется по формуле

$$F_{\text{abc}} = d^2(\omega - \sin\omega)/4, \quad (3.7)$$

в которой ω - центральный угол в радианах.

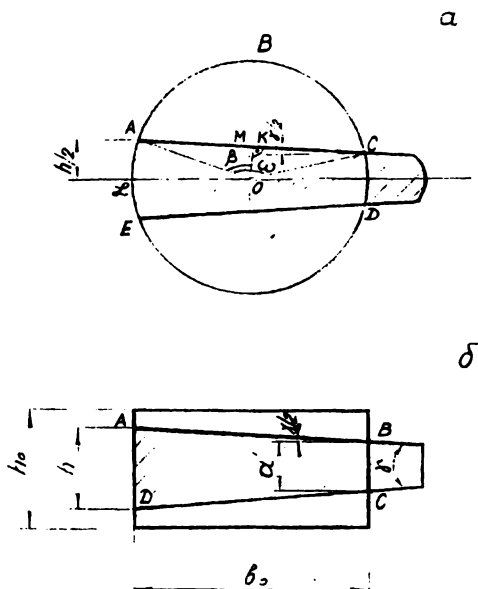


Рис.3.4. К расчету коэффициента высотной деформации при прокатке клиновидного профиля:

а - из круглой заготовки; б - из прямоугольной заготовки

Последний является суммой центральных углов, т.е. $\omega=2(\beta+\gamma/2)$, где $\beta=\pi/2-\arcsin(h/d)$, отсюда $\omega=\pi-2\arcsin(h/d)+\gamma$.

С учетом формул (3.5) и (3.7) окончательно получим

$$1/\eta = \frac{\pi}{2\arcsin(h/d) + \gamma + \sin[\pi - 2\arcsin(h/d) + \gamma]} \quad (3.8)$$

По результатам опытной прокатки построена зависимость $d/R=f(1/\eta)$ (рис. 3.5). Для сравнения по аналогичной методике параллельно проводили опыты по прокатке клиновидного профиля из

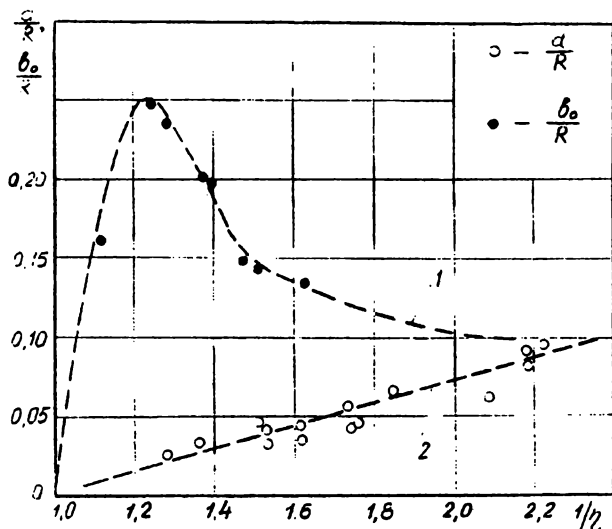


Рис.3.5. Зависимость относительной кривизны полос от коэффициента высотной деформации:
1 - прямоугольная заготовка; 2 - круглая заготовка (штриховыми линиями показан предполагаемый вид кривых)

прямоугольной заготовки сечением $h_0 \times b_0 = 15 \times 30$ мм, равновеликим кругу. Для определения коэффициента высотной деформации в этом случае использовали следующие соображения. При совмещении на рис. 3.4, б толстой кромки клиновидного профиля с кромкой прямоугольной заготовки величина $h'_{\text{тн}}$ определяется по формуле

$$h'_{\text{тн}} = h - 2b_0 \tan \gamma / 2; \quad (3.9)$$

площадь трапеции ABCD с учетом (3.5) подсчитывается так:

$$F_1 = (h - b_0 \tan \gamma / 2) b_0; \quad (3.10)$$

площадь сечения исходной заготовки равна

$$F_0 = b_0 h_0. \quad (3.11)$$

Тогда с учетом выражений (3.5), (3.10) и (3.11) для прокатки прямоугольной полосы на клиновидный профиль имеем

$$1/\eta = F_0/F_1 = h_0/(h-b_0 \operatorname{tg} \gamma/2).$$

Кривизна профиля, полученного из прямоугольной заготовки, оценивалась параметром b_0/R , зависимость которого от величины $1/\eta$ представлена на рис 3.5. Анализируя ход кривых, изображенных на рис. 3.5, можно отметить, что зависимость $b_0/R = f(1/\eta)$ имеет максимум при коэффициенте $1/\eta = 1,2$. Отсюда следует, что при прокатке прямоугольника на клин следует избегать умеренных обжатий из-за опасности чрезмерного искривления проката. Прокатку следует вести при значениях $1/\eta = 1,6 \dots 1,8$, если это позволяют возможности оборудования и пластические свойства металла. Результаты эксперимента подтвердили предположение о том, что прокатка круглой заготовки обеспечивает получение клиновидного профиля с меньшей кривизной, чем прокатка прямоугольных заготовок, по крайней мере в исследованном интервале величин $1/\eta = 1,0 \dots 1,8$. Особенно заметно снижение кривизны заготовок при небольших коэффициентах высотной деформации. Различие между кривизной полос при использовании двух видов заготовки нивелируется при больших значениях $1/\eta$.

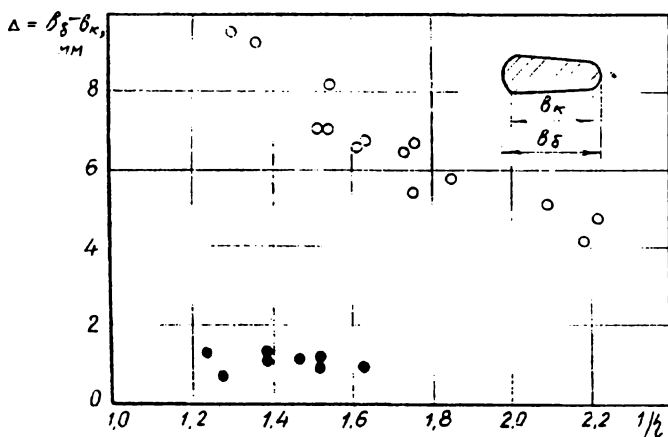


Рис.3.6. Зависимость величины боковой внеконтактной зоны от коэффициента высотной деформации при прокатке клиновидного профиля:

o - из круглой заготовки; ● - из прямоугольной

Наряду с положительным свойством - уменьшением кривизны профиля - прокатка круглой заготовки имеет существенный недостаток: значительную протяженность боковой внеконтактной зоны Δ (рис. 3.6), что связано как с бочкообразованием на краях полосы, так и с естественной кривизной контура поперечного сечения круглой заготовки. Разница в величинах ширины профиля по бочке b_b и по контактной поверхности b_k , равная 2...3 мм, устраняется при последующем волочении, поэтому полученные в опытах для прямоугольной заготовки значения $\Delta = b_b - b_k = 0,5 \dots 1,5$ мм (рис. 3.6) следует считать удовлетворительными. Вместе с тем полученные при прокатке круглой заготовки значения $\Delta = 4 \dots 10$ мм не устраняются за один-два прохода волочения, поэтому при получении клиновидного профиля из круглой заготовки следует предусмотреть обжатие его по ширине в ребровом калибре.

3.3. Влияние тенденции клиновидного профиля к ребровому изгибу на выбор режима обжатий при его прокатке

Широкосортamentная прокатка профилей электротехнического назначения на стане высокой производительности, достигаемой за счет непрерывности процесса, ставит ряд существенных задач технологического обеспечения гибкости. Технологическая гибкость полунепрерывной прокатки клиновидных полос может быть обеспечена применением пластовых проходов с максимальным подавлением тенденций к поперечному перемещению заднего конца и серпению переднего конца полосы.

Ниже описаны некоторые теоретические результаты, которые были получены при подготовке к освоению на ПНС 250 горячей прокатки меднокадмиевых клиновидных заготовок для волочения коллекторных профилей. С использованием новых для теории прокатки представлений разработано условие минимальной тенденции к серпению, полученное в предложении одновременного входа в очаг деформации и одновременного выхода из него металла по обоим краям полосы.

Профили, выпускаемые заводом по схеме прокатка + волочение, имеют толщину от 2 до 6 мм при ширине от 80 до 100 мм, угол сужения профиля по толщине составляет от $0^\circ 40'$ до $1^\circ 40'$ (у заготовки для волочения - до $2^\circ 40'$). Поскольку сортament коллекторных профилей, заготовки для которых целесообразно получать прокаткой, включает десятки позиций, то их производство

должно отвечать требованиям гибкости, достигаемой, как сказано выше, за счет пластовой прокатки профилей в наклонных цилиндрических или слабokonических валках.

Выше отмечали, что процессу пластовой прокатки клина присущи негативные особенности, связанные с асимметрией распределения обжатия и скорости течения металла по ширине профиля: тенденции к поперечному смещению (боковому уgonу) полосы на входе в валки и ее изгибу в горизонтальной плоскости (серпению) на выходе из валков. Угон и серпение предотвращаются соответственно задней и передней проводками, но при этом развиваются значительные усилия, вследствие чего проводки работают как силовые, т.е. принимают участие в деформации полосы. Тем самым на выбор режима прокатки накладывается требование минимизировать тенденцию к ребровому изгибу (серпению) полосы, поскольку в ситуации, когда эта тенденция значительна, ее подавление выводной проводкой вызывает опасность образования на полосе волнистости.

Определению ребрового изгиба и условий его предотвращения при прокатке тонкой полосы посвящена обширная литература [10-16, 18-20], однако вопрос далеко не исчерпан. Так, ни один из известных подходов, как упомянуто в подразделе 3.1, не учитывает влияния уширения, хотя при прокатке с неравномерным по ширине полосы обжатием к обычной схеме деформации добавляется изгиб полосы в очаге деформации, и поэтому поперечное течение неизбежно даже тогда, когда ширина полосы очень велика. Рассмотрим еще один подход к решению этих вопросов.

Простой по своему смыслу критерий равенства вытяжек по толстой и тонкой кромкам (деформационный критерий) далеко не прост в прикладном отношении: любое вертикальное волокно в составе исходного поперечного сечения при прохождении очага деформации смещается в поперечном направлении, и поэтому вопрос о теоретическом определении вытяжки по той или иной кромке оказывается сложным. Критерий равенства продольных скоростей на выходе из очага деформации (кинематический критерий) также сложен в прикладном отношении, поскольку требует решения непростой задачи о положении нейтральной линии при прокатке, сочетающейся с ребровым изгибом полосы в пределах очага деформации⁶. Таким образом, в применении к вопросам ребрового изгиба и условий предотвращения серпения целесообразен поиск новых подходов.

⁶ Используя правило замкнутых контуров И.М. Павлова, нетрудно показать, что при ровном входе полосы в валки кинематический критерий отсутствия серпения сводится к деформационному и наоборот.

Используем представление о том, что при равном входе полосы условие обеспечения равного выхода сводится к требованию: частицы металла на противоположных кромках полосы, одновременно поступающие в очаг деформации, должны одновременно выходить из него (условие равного времени деформации тонкой и толстой кромок или, что то же самое, - условие стабильного массопереноса в продольном направлении прокатки). Инженерную формулировку этого условия представим в виде:

$$\Delta V_{\beta_{тн}} / \Delta V_{\beta_{тл}} = (l_{тн} / l_{тл}) \rho, \quad (3.12)$$

где ΔV_{β} - объем металла, смещенный в уширение с одной из сторон полосы;

l - длина очага деформации с этой стороны;

ρ - некоторый положительный параметр; здесь и далее индекс «тн» относится к тонкой кромке, индекс «тл» - к толстой.

В соответствии с (3.12), чем больше длина очага деформации с некоторой стороны, тем больше металла должно сместиться в эту сторону и меньше - в длину, чтобы обеспечить по этой стороне понижение вытяжки, уменьшение скорости выхода из валков и тем самым обеспечить такую же длительность прохождения очага деформации металлом, что и с противоположной стороны. Соответствие формулы (3.12) приведенной формулировке обеспечивается надлежащим значением величины ρ .

В первом приближении $\rho=1$, и тогда из (3.12) следует:

$$h_{ср_{тн}} \Delta b_{\kappa_{тн}} = h_{ср_{тл}} \Delta b_{\kappa_{тл}}, \quad (3.13)$$

где Δb_{κ} - уширение по кромке, имеющей в очаге деформации среднюю толщину $h_{ср}$.

В результате приведенного в подразделе 3.1 теоретического анализа распределения уширения по кромкам найдено, что

$$\Delta b_{\kappa_{тн}} / \Delta b_{\kappa_{тл}} = [l_{тн} \ln(h_{отн} / h_{лтн})] / [l_{тл} \ln(h_{отл} / h_{лтл})]. \quad (3.14)$$

Подставляя (3.14) в (3.13), получаем

$$(h_{отн} / h_{лтн})^{l_{тн} / h_{ср_{тн}}} = (h_{отл} / h_{лтл})^{l_{тл} / h_{ср_{тл}}}$$

или, что то же самое,

$$\omega_{\beta_{тн}} \ln(h_{отн} / h_{лтн}) = \omega_{\beta_{тл}} \ln(h_{отл} / h_{лтл}), \quad (3.15)$$

где $\omega_{\beta_{тн}} = l_{тн} h_{ср_{тн}}$, $\omega_{\beta_{тл}} = l_{тл} h_{ср_{тл}}$ - площади проекций на вертикальную плоскость прокатки боковых поверхностей тонкой и толстой кромок соответственно (в пределах очага деформации).

Используя известный аппарат анализа формул (например, [21]), нетрудно показать, что условию (3.15) эквивалентна формулировка

$$|\xi| = 0, \quad (3.16)$$

где

$$\xi = \frac{\omega_{\text{вх}} - \omega_{\text{вн}}}{\omega_{\text{вх}} + \omega_{\text{вн}}} + \frac{\ln(h_{\text{отв}}/h_{1\text{тв}}) - \ln(h_{\text{отн}}/h_{1\text{тн}})}{\ln(h_{\text{отв}}/h_{1\text{тв}}) + \ln(h_{\text{отн}}/h_{1\text{тн}})}. \quad (3.17)$$

Из формул (3.16) и (3.17) вытекают известные в литературе выводы о возможных вариантах обеспечения ровного выхода клиновидной полосы (например, применение конусных валков со сближающимися осями).

При использовании выводных проводок выполнение условия (3.16) не обязательно; но по причинам, рассмотренным выше, весьма желательно иметь

$$|\xi| = \min. \quad (3.18)$$

В производственных условиях прокатку ведут с выводной проводкой со стороны толстой кромки, однако условие ровного выхода полосы из валков полезно иметь в виду и при разработке режима прокатки с искусственным сдерживанием серпения. Чем ближе параметры прокатки к тем значениям, при которых выполняется условие естественного обеспечения ровности, тем меньше усилие прижатия полосы к выводной проводке и тем выше гарантия, что стремление к серпению, сдерживаемое выводной проводкой, не обернется волнистостью полосы по тонкой кромке. Из анализа формулы (3.17) следует, что приблизиться к условию (3.16) тем проще, чем толще прокатываемая полоса и больше ее обжатие. Углубленный анализ формулы (3.17) показывает, что снижению тенденции к серпению способствуют те же обстоятельства, которые ведут к увеличению уширения. Последние выводы, полученные на основании теоретического анализа, полностью подтвердились результатами последующей опытной и промышленной прокатки, изложенными в подразделах 3.4 и 4.1.

На полунепрерывном стане обычно стремятся равномерно загрузить все клетки, участвующие в прокатке. Тем не менее с учетом анализа формулы (3.17) принцип максимально интенсивных обжатий остается предпочтительным для проходов, в которых формируется клин (за исключением чистового). Существенно также то обстоятельство, что чем интенсивнее обжатия при формировании клина, тем меньше требуется специализированных проходов и тем меньше количество комплектов валков, предназначенных для прокатки собственно клиновидного профиля. Повышенные обжатия ускоряют износ валков, что не столь существенно, так как получаемый профиль является не товарной продукцией, а служит

заготовкой под последующее волочение. Однако интенсивный износ чистовых валков все же недопустим, и поэтому обжатие в последнем проходе следует смягчать.

Во избежание поперечного смещения (угона) заднего конца полосы требуется использовать вводную проводку, которая воспринимает усилие, зависящее от развитости тенденции к угону.

Применительно к процессу входа заготовки в валки целесообразно рассмотреть не столько ровность, сколько стабильность, так как задача полосы перпендикулярно плоскости осей валков (ровный вход), в сущности, не является наилучшим вариантом; в общем случае полезнее задача под углом (косой вход). Инженерная формулировка стабильного входа имеет вид

$$l_{\text{тн}} = l_{\text{тн}}; \quad (3.19)$$

следствием является требование стабилизации входа

$$|(l_{\text{тн}} - l_{\text{тн}})/(l_{\text{тн}} + l_{\text{тн}})| = \min, \quad (3.20)$$

которое может быть удовлетворено при косой задаче заготовки.

3.4. Экспериментальное исследование прокатки клиновидного профиля

На первом этапе освоения ПНС 250 было налажено производство ряда размеров заготовок медных шин прямоугольного поперечного сечения. Далее была поставлена задача разработать и внедрить технологию горячей прокатки клиновидных профилей из кадмиевой бронзы БрКд1, являющихся заготовками для коллекторных полос. Существовавшая в это время технология производства этих изделий (горячее прессование круглого слитка диам. 190 мм на заготовку клиновидного сечения, последующее 3 – 5 - проходное волочение с промежуточными отжигами и травлениями после каждой протяжки) была малопродуктивна, отличалась большими потерями металла и сопровождалась многими транспортными операциями.

Поэтому внедрение технологии, включающей горячую прокатку клиновидного профиля на непрерывном стане из прессованной заготовки квадратного сечения 95х95 мм с последующим 2 – 3 - проходным волочением его на готовый профиль, должно было дать значительный экономический эффект. Однако ряд особенностей прокатки полос клиновидного сечения из прямоугольной заготовки (неравномерность деформации полосы по ширине, вызывающая ее серповидность, наличие в связи с этим значительного силового воздействия полосы на проводковую арматуру; необходимость перекоса осей валков рабочих клетей в вертикальной плоскости и др.) создали определенные трудности при разработке этой технологии.

Была выбрана технологическая схема, в соответствии с которой клиновидный профиль предполагалось формировать в двух последних клетях⁷ непрерывной группы 350, между которыми устанавливалась жесткая проводковая арматура. Это потребовало дополнительно к теоретическому анализу проведения экспериментального исследования.

Исследование проводили на лабораторном стане 200, имеющем набор валков с углами конусности одного валка $\gamma=1,2,3$ и 4° , что позволяло прокатывать на них полосы клиновидного сечения с углами 2γ . Были использованы свинцовые образцы прямоугольного поперечного сечения с соотношением сторон $b_0/h_0=2\ldots 6$. Все опыты проводились с применением жесткой вводной проводки. При прокатке с выводной проводкой ее установили со стороны толстой кромки выходящей из валков клиновидной полосы. Обе проводки, несмотря на небольшую длину (200 мм), хорошо удерживали задний конец полосы от бокового смещения и препятствовали серпению переднего конца полосы.

В первой серии опытов исследовали влияние числа проходов, за которое из исходной заготовки прямоугольного сечения формируется необходимый клиновидный профиль, на радиус серпения полосы. С этой целью заготовки с различными b_0/h_0 прокатывали на полосу клиновидного сечения со свободным серпением (без выводной проводки) за один или два прохода с одинаковой общей степенью деформации. Радиус серпения R_c определяли на основе экспериментальных данных по формуле

$$R_c = 0,5b_1(\lambda_{тн} + \lambda_{тл})/(\lambda_{тн} - \lambda_{тл}),$$

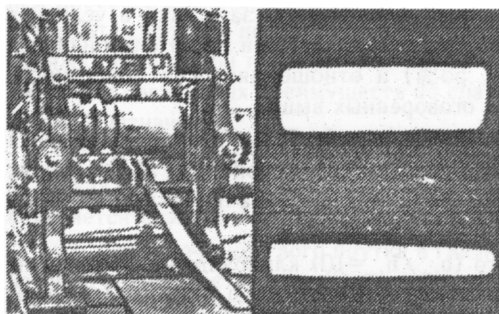
где $\lambda_{тн} = l_{тн}/l_0$ и $\lambda_{тл} = l_{тл}/l_0$ - вытяжки по тонкой и толстой кромкам соответственно; $l_{тн}$ и $l_{тл}$ - длина полосы после прокатки по тонкой и толстой кромкам соответственно, мм; l_0 - длина исходной заготовки, мм; b_1 - ширина полосы после прокатки, мм.

Во всех случаях радиус серпения полос, прокатанных за один проход, оказался выше, а серповидность соответственно ниже, чем у полос, прокатанных за два прохода. Следовательно, нецелесообразно начинать формирование клиновидного профиля с первой же клетки непрерывной группы, а тем более в обжимной клетки.

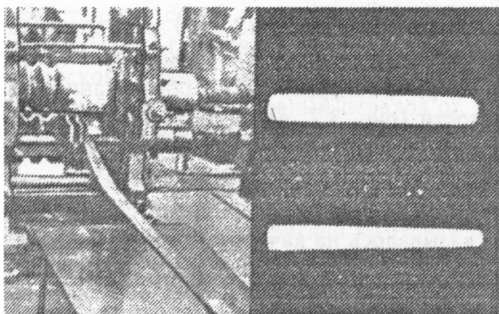
⁷ Согласно другой точке зрения, предполагалось формировать клиновидный профиль последовательно с первых же клеток непрерывной группы или даже в последнем калибре обжимной клетки. Для этого необходимо было нарезать калибры клиновидной формы (причем для каждого профиля свой набор калибров) на валках всех клеток НГ 350 и еще один такой калибр в обжимной клетки. Последнее предложение противоречило требованию универсальности и гибкости калибровки, однако его авторы считали, что таким образом удастся уменьшить неравномерность деформации в каждом проходе и снизить тем самым давление полосы на проводки.

На основе опытного и теоретического исследований был рекомендован к внедрению вариант с формированием клиновидного профиля в двух последних клетях группы 350, причем в чистовой клети прокатку сформированного на клин профиля необходимо проводить с равномерным по ширине относительным обжатием.

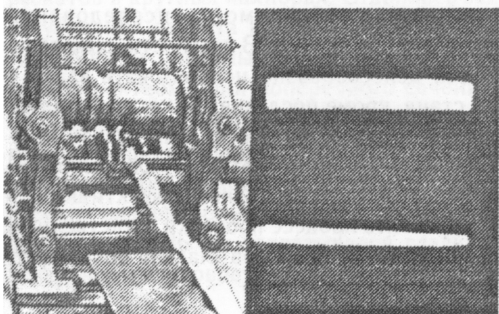
Рис.3.7. Внешний вид прокатанных полос и темплеты заготовок и полос при прокатке в следующих условиях:



а - относительно толстый ($b_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} = 6,8$) клиновидный профиль из толстой ($b_0/h_0=3$) заготовки при значительной неравномерности обжатия по ширине ($1/\eta_{\text{та}}=2,62$; $1/\eta_{\text{тд}}=1,91$) и высокой общей степени деформации ($\epsilon=53\%$);



б - относительно тонкий ($b_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}=10$) клиновидный профиль из заготовки с $b_0/h_0=6,6$ при высокой неравномерности обжатия по ширине ($1/\eta_{\text{та}}=1,81$; $1/\eta_{\text{тд}}=1,21$) и умеренной общей степени деформации ($\epsilon=30\%$);



в - тонкий и широкий ($b_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}=14,4$) клиновидный профиль из заготовки с $b_0/h_0=5,9$ при резко выраженной неравномерности обжатия по ширине ($1/\eta_{\text{та}}=3,2$; $1/\eta_{\text{тд}}=1,7$) и высокой общей степени деформации ($\epsilon=52\%$);

Во второй серии опытов моделировали процесс прокатки по этому варианту. Опыты проводили с использованием выводной проводки при различных значениях степени деформации $\epsilon = \Delta h_{\text{ср}} / h_{\text{ср}}$, угла профиля заготовки и готовой полосы 2γ и соотношений размеров исходной заготовки b_0 / h_0 .

По результатам этой серии опытов установлено, что процесс проходил достаточно устойчиво и без значительной волнистости при прокатке:

- клиновидного профиля из клиновидной заготовки в условиях практически равномерного по ширине обжатия при значительной общей степени деформации ($\epsilon = 40 \dots 55\%$) и отношениях осей поперечного сечения исходной заготовки, оговоренных выше;

- относительно толстого ($b_{\text{ср}} / h_{\text{ср}} = 5 \dots 7$) клиновидного профиля из толстой ($b_0 / h_0 = 3$) прямоугольной заготовки (рис. 3.7, а) в условиях неравномерного по ширине обжатия при значительной степени деформации ($\epsilon = 40 \dots 55\%$);

- относительно тонкого ($b_{\text{ср}} / h_{\text{ср}} = 10$) клиновидного профиля из прямоугольной заготовки с соотношением сторон $b_0 / h_0 = 6$ (рис. 3.7, б) при неравномерном по ширине обжатии и умеренной степени деформации ($\epsilon = 30\%$).

Прокатка тонкого и широкого ($b_{\text{ср}} / h_{\text{ср}} = 12 \dots 15$) клиновидного профиля из прямоугольной заготовки в условиях резко выраженной неравномерности обжатия по ширине сопровождается образованием на полосе значительной волнистости (рис. 3.7, в). Естественно, что при прокатке в промышленных условиях значительная волнистость, особенно на готовой горячекатаной полосе, недопустима. Практика показала, что наличие незначительной волнистости на полосах не препятствовало их дальнейшей обработке и не сказывалось на качестве готовых изделий.

3.5. Экспериментальное исследование схемы прокатки круг-гладкая бочка-круг

За последние 25-30 лет для производства катанки стали применять непрерывные станы; это вызвало необходимость исследования рациональности применяемых на них калибровок. В частности, выявлено, что при прокатке мелких кругов целесообразно использовать валки с гладкой бочкой во всех клетях стана, кроме последней, в которой полосе придается окончательная круглая форма. Этот способ был назван RER-rolling [5,22,23]. RER-процесс не рассчитан на прокатку кругов в широком сортаменте, однако идея применения гладких валков эффективна и в том случае, когда стремление упростить процесс прокатки естественным путем приводит к универсальной системе калибров гладкая бочка-круг.

Задача разработки и исследования такой калибровки была поставлена в связи с необходимостью освоить ПНС 250, предназначенный для прокатки профилей весьма широкого сортамента, в том числе круглых прутков и катанки diam. 40...8 мм. Промышленный опыт показывает, что применительно к условиям такого стана серьезным конкурентом RER-процессу является прокатка по системе плоский овал-круг.

Известно, что условия деформации плоскоовальной полосы в круглом калибре практически не отличаются от условий деформации в нем плоского раската, полученного прокаткой круга на гладкой бочке. Это дало основания полагать, что при примерно равных возможностях вытяжки с системой плоский овал-круг калибровка гладкая бочка-круг имеет ряд следующих преимуществ по сравнению с другими системами того же назначения.

1. Отсутствует необходимость нарезать плоскоовальный калибр на валках для получения полосы плоскоовального сечения. Как следствие, появляется возможность использовать всю длину бочки валка.

2. Для задачи круглого прутка в гладкие валки и плоского овала в круглый калибр достаточно использовать простые проводки с линейками в виде двух плоских пропусков.

3. При прокатке по RER-процессу предчистовой профиль представляет собой прямоугольник со слегка выпуклыми стенками, а по калибровке гладкая бочка-круг предчистовой профиль близок по форме к плоскому овалу, поэтому калибровка по сравнению с RER-процессом обеспечивает более плавный переход от предчистовой плоскоовальной полосы к чистовому кругу.

Несмотря на явную перспективность калибровки гладкая бочка-круг, ее применение было известно только для прокатки на обжимных станах при получении круглой заготовки из круглого слитка (а.с. 358035 СССР). Чтобы установить технологические возможности этой системы, на стане 200 были проведены опыты по прокатке свинцовых образцов исходного круглого сечения на гладкой бочке, а затем - полученных раскатов в круглых калибрах. Ставилась задача получить представление об условиях захвата круглого профиля в гладких валках, о вытяжной способности системы, об устойчивости плоского раската в круглом калибре, о геометрии поперечного сечения раскатов.

Плоские раскаты, полученные прокаткой круга на гладкой бочке, имели профиль с плавными очертаниями без каких-либо заострений, с дугообразными боковыми кромками, т.е. по качеству были не хуже плоских овалов, полученных в ручьевых валках (рис. 3.8 и 3.9). Круглый прутки diam. 36 мм захватывались гладкими валками со шлифованной поверхностью удовлетворительно; предельные углы захвата составляли:

при свободной естественной задаче до 13° , при задаче с некоторым принуждением, характерным для непрерывных станов, - до 16° , при принудительной задаче со значительным усилием -19° .

Предельные углы захвата квадратного прутка 30×30 мм, прокатанного для сравнения в тех же условиях, оказались соответственно на 1...2° выше. Значительного увеличения угла захвата достигали при прокатке круглых и квадратных прутков на гладких валках, протравленных 15%-ным раствором соляной кислоты. Угол захвата при свободной задаче достигал при этом 30° .

Значения вытяжек при прокатке круглого прутка на гладкой бочке приведены ниже

ε, %	16	23	33	41	50
λ	-1,04	1,09/1,05	1,17/1,10	1,23/-	1,32/1,28

Числитель - при $d_0=36$ мм, знаменатель - при $d_0=20$ мм.

Раскаты, полученные прокаткой круглого прутка на гладкой бочке, задавали далее в круглые калибры и получали ряд профилей с различной степенью заполнения, из которых затем выбирали полосы с правильно оформленным круглым сечением. Таким путем устанавливали круг, получаемый из исходной круглой заготовки через плоскоовальную полосу. Опыты выявили хорошую устойчивость плоского овала в круглом калибре: сваливания не наблюдалось при отношении осей овала до 4,5. Захват также осуществляется надежно.

Пример реализации калибровки в лабораторных опытах приведен на рис. 3.8. Необходимо отметить характерную для системы круг-гладкая бочка-круг неравномерность распределения вытяжек по проходам: например, вытяжки на гладкой бочке и в круглом калибре составили соответственно 1,18 и 1,40 (см. рис. 3.8, б).

По калибровке круг-гладкая бочка-круг на лабораторном стане 200 провели также горячую прокатку полос из кадмиевой бронзы. Из исходной круглой заготовки диам. 20 мм получали (через соответствующие плоскоовальные полосы) круглые профили диам. 18, 16, 14 мм и затем из круга диам. 14 мм - круги диам. 12, 11, 10, 9 мм (рис. 3.9). При этом максимальная суммарная вытяжка за 2 прохода (например, с $d_0=14$ мм до $d_0=9$ мм) составила 2,42, что свидетельствует о достаточно высокой вытяжной способности калибровки. Качество полученных круглых профилей удовлетворяет условию дальнейшей их обработки волочением до готовых размеров.

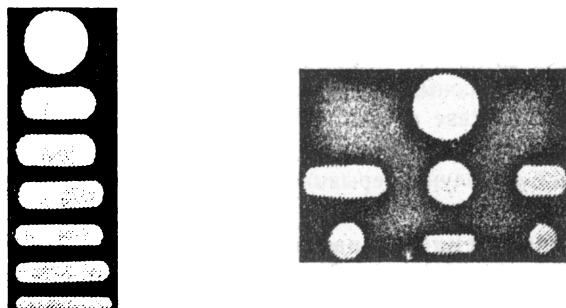


Рис.3.8. Темплеты свинцовых полос при прокатке круглой заготовки диаметром 36 мм на лабораторном стане 200:

а - последовательное плющение на гладкой бочке ; б - получение прутка диам. 16 мм по схеме круг-гладкая бочка-круг из заготовки диам. 36 мм

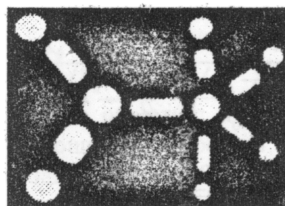


Рис.3.9. Темплеты меднокадмиевых полос при лабораторной горячей прокатке по схеме круг-гладкая бочка-круг заготовки диам. 20 мм на круги диам. 18, 16, 14, 12, 11, 10 и 9 мм

3.6. Методика расчета вытяжки и уширения при прокатке прямоугольных, клиновидных и круглых профилей на непрерывном стане

Прокатка на непрерывном стане принципиально отличается от широко распространенной на заводах по обработке цветных металлов прокатки на станах линейного типа; несмотря на то, что непрерывную прокатку стремятся проводить без натяжения (во избежание разнотолщинности). Производительность непрерывного стана определяется его узким местом -клетью, на валках которой нарезаны калибры с пониженной вытяжной способностью, поэтому применять в

прочих клетях калибры с высокой вытяжной способностью нецелесообразно, так как их потенциальные возможности использовать не удается.

С другой стороны, следует стремиться к равномерной загрузке всех клеток в составе группы. Указанные обстоятельства объясняют проявившуюся в последние годы тенденцию к использованию на непрерывных и полунепрерывных станах калибров с пониженной вытяжной способностью.

В отечественной практике при освоении ПНС 250, предназначенного для прокатки широкого сортамента прямоугольных, клиновидных и круглых профилей из медных сплавов, были предложены и затем использованы проходы в гладких валках (рис. 3.10), в дальнейшем эти проходы называются плющильными.

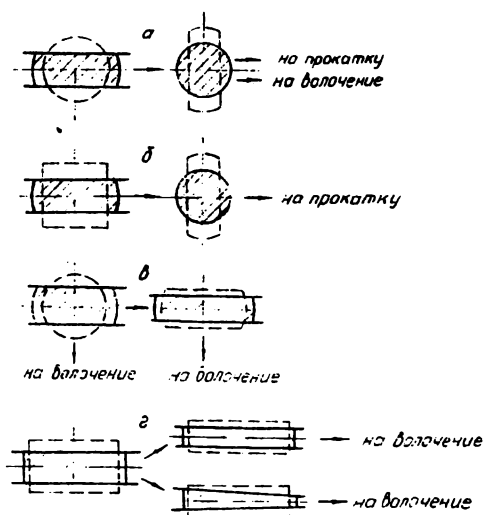


Рис.3.10. Схема плющения в гладких валках круглой (а,в), квадратной (б) и прямоугольной (г) заготовок с получением круглого прутка (а, б), шины (в, г) и клиновидной полосы (г)

При применении плющильных (плоских) калибров необходим анализ формоизменения в этих простейших вариантах прокатки. Расчет формоизменения меди по известным методикам ведет к значительным погрешностям, поэтому проведены многочисленные эксперименты по прокатке меди в лабораторных условиях и на промышленном стане.

Экспериментальная формула для расчета коэффициента вытяжки λ при плющении медной заготовки с плоскими горизонтальными гранями и округлыми боковыми поверхностями (рис. 3.11, а):

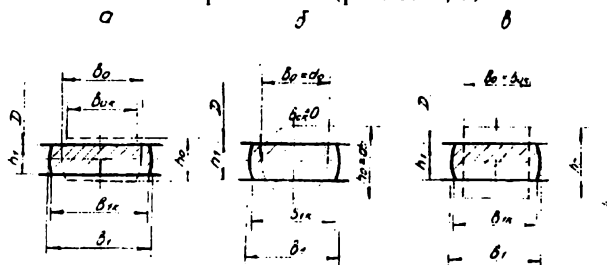


Рис.3.11. Схемы для расчета вытяжки при прокатке в гладких валах полосовой (а), круглой (б) и квадратной (в) заготовок

$$\lambda = 1 + \frac{K_\phi}{1 + h_0/b_0} \left(1 + \frac{2h_0/b_0}{1 + D/b_0} \right) \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right), \quad (3.21)$$

где $1/\eta = h_0/h_1$ - коэффициент обжатия; h_0 и b_0 - высота и ширина заготовки; h_1 - высота плющеного профиля; D - диаметр валков; K_ϕ - коэффициент формы заготовки: $K_\phi = 0,5(1 + h_0 b_{ок}/\Omega_0)$; $b_{ок}$ - ширина плоских горизонтальных граней заготовки (ширина заготовки по контакту); Ω_0 - площадь поперечного сечения заготовки.

Если заготовка - круг (рис. 3.11, б), то $b_{ок} = 0$, $h_0 = b_0 = d$, $K_\phi = 1/2$ и формула (3.21) приобретает вид

$$\lambda = 1 + 0,25 \frac{D/d_0 + 3}{D/d_0 + 1} \left(\frac{d_0}{h_1} - 1 \right), \quad (3.22)$$

где d_0 - диаметр исходного круглого профиля.

Если заготовка - квадрат (рис. 3.11, в), то $b_{ок} = h_0 = b_0$, $K_\phi = 1$ и формула (3.21) преобразуется:

$$\lambda = 1 + 0,5 \frac{D/b_0 + 3}{D/b_0 + 1} \left(\frac{h_0}{h_1} - 1 \right). \quad (3.23)$$

Ширина b_1 и ширина плоских горизонтальных граней $b_{1к}$ плоскоовального профиля определяются формулами

$$b_1 = 3\Omega_0/\lambda h_1(2+m); \quad b_{1к} = m b_1, \quad (3.24)$$

причем при плющении круга $m = \sqrt{1-\eta}$, квадрата $m = \sqrt{1-\eta}$ (где $\eta = h_1/h_0$ - коэффициент утонения за два прохода).

Если плоскоовальный профиль подвергается дополнительному плющению, то вытяжка во втором проходе рассчитывается по общей формуле (3.21). После вторичного плющения получается плоскоовальный профиль с размерами b_1 и $b_{1к}$, определяемыми по формуле (3.24).

Применительно к прокатке по системе круг-гладкая бочка-круг в валках диаметром D используются формулы (3.22), (3.24) и дополнительно формула коэффициента вытяжки за два прохода:

$$\lambda_z = 1 + \frac{3}{\sqrt{D/d_0}} \left(\frac{d_0}{h_1} - 1 \right), \quad (3.25)$$

где h_1 - толщина промежуточного плоскоовального профиля.

Эта формула позволяет определить диаметр круга d_1 , получаемого после прокатки плоскоовального профиля в круглом калибре:

$$d_1 = d_0 \sqrt{\lambda_z}.$$

Даже при клиновидности получаемого профиля не более 3...4° прокатка клиновидной полосы из прямоугольной заготовки сопряжена с определенными трудностями. При прокатке в конических валках с параллельными осями неравномерность обжатия порождает боковое смещение (угон) полосы в сторону толстой кромки на входе в валки и образование серповидности полосы на выходе из валков. Серповидность устраняется проводками, однако при этом они испытывают усилия, достигающие нескольких десятков килоньютон.

При сдерживании выводной проводкой сильного стремления полосы к серпению возникает другой дефект - волнистость клиновидной полосы. Во избежание этого при разработке режимов прокатки клиновидных профилей необходимо обеспечить условия одновременного захвата по всей ширине заготовки и ровного выхода полосы из валков. Эти условия подробно рассмотрены в подразделах 3.1 и 3.3; здесь изложена инженерная методика, учитывающая их.

Условие одновременного захвата заготовки валками с параллельными осями определяется так: $\delta_0 = \delta_1 / \cos \alpha$, где δ_0 и δ_1 - углы сужения клиновидной заготовки и межвалковой щели (рис. 3.2);

$\alpha = \sqrt{4h/R_{cp}}$ - угол захвата; R_{cp} - средний радиус валков.

Условие одновременного захвата заготовки валками с пересекающимися осями имеет вид

$$\delta_0 = (1 + \alpha^2/2) \delta_1 - \alpha^2 \operatorname{tg}(\gamma/2), \quad (3.26)$$

где γ - угол пересечения осей валков:

$$\gamma = 2 \arctg[\delta_0/\alpha^2 - (0,5 - 1/\alpha^2)\delta_1].$$

Формула (3.26) показывает, что, имея валки с пересекающимися осями, можно обеспечить одновременный захват даже прямоугольной заготовки (когда $\delta_0 = 0$). Это вполне согласуется с выводами работы [20].

Условие ровного выхода полосы из валков формулируется так:

$$\Delta h_{\text{тн}} / \Delta h_{\text{тл}} = l_{\text{тл}} / l_{\text{тн}},$$

где $l_{\text{тн}}$ и $l_{\text{тл}}$ - длина очага деформации со стороны тонкой и толстой кромок.

Выполнить условие ровного выхода тем проще, чем толще прокатываемая полоса и больше ее обжатие. При прокатке клина из прямоугольной заготовки серпение тем слабее, чем меньше угол клиновидности и ширина заготовки, больше обжатие полосы в целом, т.е. меньше разница в обжатиях по тонкой и толстой кромкам, чем больше диаметр валков и соответственно больше длина очага деформации.

Установлено, что для расчета уширения, вытяжки и давления при прокатке клиновидного профиля можно использовать формулы, практически совпадающие с формулами, относящимися к простому случаю прокатки. В частности, абсолютное уширение рассчитывается по вышеприведенной формуле (3.3):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h_{\text{ср}}} = \frac{a}{2} \frac{l_{\text{ср}}}{h_{\text{ср}}} \left[1 - \left(\frac{0,25}{l_{\text{ср}}/b_0} + \frac{\sigma_0}{\tau_s} \right) \sqrt{0,75 l_{\text{ср}}/b_0} \right],$$

где $\Delta h_{\text{ср}}$ - среднее абсолютное обжатие; a - коэффициент (для медных сплавов $a=0,8...0,9$); $l_{\text{ср}}$ - средняя длина очага деформации ($l_{\text{ср}} = \sqrt{\Delta h_{\text{ср}} R_{\text{ср}}}$); b_0 - начальная ширина полосы; σ_0 - напряжение заднего натяжения; τ_s - предел текучести на сдвиг.

3.7. Жесткость рабочих клеток 350 и 300

При разработке технологии горячей прокатки иногда, а при холодной прокатке (в том числе сортовой) практически всегда возникает задача определения жесткости рабочей клетки, если она не указана в технической характеристике оборудования стана.

Применительно к вопросу о жесткости клетки важнейшей является формула Симса - Головина

$$h_1 = S + \frac{P}{C}, \quad (3.27)$$

где h_1 - толщина прокатываемой полосы на выходе из валков;

S - установочный зазор между валками;

P - усилие прокатки;

C - коэффициент жесткости рабочей клетки.

Формулу (3.27) можно переписать в виде

$$C = \frac{P}{h_1 - S} \quad (3.28)$$

или

$$P = C(h_1 - S). \quad (3.29)$$

Из соотношения (3.28) следует, что коэффициент жесткости представляет собой величину, характеризующую усилие прокатки, вызывающее вертикальную упругую деформацию (распор) рабочей клетки $f_{кл} = h_1 \cdot S$, равную 1 мм. Зависимость (3.29) позволяет трактовать величину коэффициента жесткости как своеобразный модуль упругости рабочей клетки в целом (по аналогии с законом Гука).

Величина $f_{кл}$ определяется суммой упругих деформаций всех элементов рабочей клетки [24], поэтому в общем случае значение коэффициента жесткости обусловлено конструкцией и размерами рабочей клетки, а также шириной прокатываемой полосы и местом приложения равнодействующей усилия прокатки.

Знание величины C дает возможность решать следующие задачи.

1. Из формулы (3.27) можно определить установочный зазор между валками S , обеспечивающий получение проката необходимой толщины h_1 , при известном усилии прокатки P , зависящем от условий деформации (обжатия, диаметра валков, коэффициента трения, скорости прокатки, натяжения и т.д.) и свойств прокатываемого материала. Графическая интерпретация решения этой задачи показана на рис. 3.12. Проведя через точку A с координатами h_1 и P_1 прямую под углом $\alpha = \arctg C$, на оси абсцисс получим значение установочного зазора. Видно, что при абсолютной жесткости, т.е. при $C \rightarrow \infty$, толщина полосы после прокатки h_1 была бы равна зазору S , установленному до прокатки.

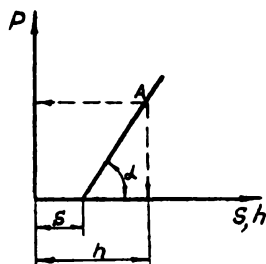


Рис.3.12. К определению установочного зазора между валками

2. Зная C , нетрудно оценить возможность получения проката в требуемом поле допусков по толщине. Усилие прокатки изменяется в пределах $\pm \Delta P$ из-за разнотолщинности полосы и неоднородности ее механических свойств по длине, изменения натяжения, условий трения и т.п. При заданном коэффициенте жесткости клетки изменение деформации клетки $\Delta f_{кл}$, приводящее к соответствующей продольной разнотолщинности, определяется из формулы (3.27):

$$\Delta f_{\text{м}} = \frac{\pm \Delta P}{C} \quad (3.30)$$

Естественно, что точность прокатки будет удовлетворять допуску по толщине полосы Δ в случае, когда $|\Delta f_{\text{м}}| < \Delta$.

Величину коэффициента жесткости определяют разными способами.

Рассчитав упругую деформацию каждого элемента рабочей клетки известными методами [24] при различных условиях прокатки, можно найти теоретическое значение коэффициента жесткости. Этот способ требует большого количества громоздких расчетов. Упругую деформацию клетки можно также определить экспериментально, однако это сложная и трудоемкая операция [25].

Экспериментальное значение C находят путем измерения усилия на валки и толщины полосы при прокатке за несколько проходов при постоянном межвалковом зазоре, т.е. определяют угол наклона прямой на рис. 3.12. Этот достаточно точный способ требует оснащения стана тензометрической аппаратурой.

На практике, в цеховых условиях, с инженерной точностью величину C можно определить с помощью расчетно-экспериментального метода прокатки двух полос. Метод заключается в том, что при одной и той же установке валков (при одном и том же начальном межвалковом зазоре клетки) на участках валков с гладкой бочкой проводят холодную прокатку двух полос из заготовок одинаковой толщины, но резко (в несколько раз) различающейся ширины. После прокатки измеряют микрометром толщины прокатанных полос $h_{\text{шпр}}$ и $h_{\text{узк}}$ и находят разность между ними

$$\delta h = h_{\text{шпр}} - h_{\text{узк}},$$

а также рассчитывают разность между усилиями прокатки той и другой полосы

$$\delta P = P_{\text{шпр}} - P_{\text{узк}}.$$

Усилие прокатки определяют расчетом по известной формуле

$$P = pF,$$

где p - среднее давление металла на валки,

F - площадь контактной поверхности, м^2 :

$$F = lb_{\text{ср}},$$

где

$$b_{\text{ср}} = (b_0 + b_1) / 2.$$

Для случая прокатки с $l/h_{\text{ср}} > 1$

$$P = 1,15 \pi \sigma_{\text{ср}},$$

где $\eta_{\sigma} = 1 + \mu(l/h_{cp} - 1)$ - коэффициент напряженного состояния; h_{cp} - средняя высота полосы при прокатке; $l = \sqrt{R(h_0 - h_1)}$ - длина очага деформации; R - радиус валков; μ - коэффициент контактного трения, при прокатке медной полосы принимают $\mu = 0,20 \dots 0,25$; $\sigma_{ср}$ - среднее по очагу деформации сопротивление металла деформации, определяемое в зависимости от относительного обжатия $\epsilon = (h_0 - h_1)/h_0$ по кривым упрочнения для соответствующего материала, например, из [26,27]. С целью повышения точности найденного результата проводят несколько (не менее трех) опытов с одной парой или другими парами полос, затем полученные данные усредняют.

Для определения того, достаточно ли жесткости клетки для получения в ней прокатываемого профиля требуемой точности, обычно принимают, что колебание усилия прокатки ΔP составляет (в зависимости от влияния разнообразных факторов) величину 10%, т.е. $\Delta P = \pm 0,1P$. Если рассчитанное отклонение от номинального значения толщины полосы при таких колебаниях усилия прокатки не превышает допустимого отклонения на продукцию, то считают, что жесткости у клетки достаточно для получения проката заданной точности по вертикальному размеру профиля.

При определении жесткости одной из рабочих клеток 300 ПНС 250 провели холодную прокатку двух позиций заготовок из меди М1 размерами $h_0 \times b_0 = 8 \times 30$ и 8×60 мм с различными значениями коэффициента высотного обжатия $1/\eta$. Результаты измерений и расчетов, проведенных по вышеописанной методике, приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Определение жесткости клетки 300

Номер опыта	Размеры сечения заготовок	Усилие прокатки	Конечная толщина полосы	Коэффициент обжатия	Разность между усилиями прокатки	Разность между толщинами полос	Коэффициент жесткости клетки
	$h_0 \times b_0$, мм	P , кН	h_1 , мм	$1/\eta$	δP , кН	δh , мм	$C = \delta P / \delta h$, кН/мм
1	8x30	236	5.90	1.36	198	0.35	566
	8x60	434	6.25	1.28			
2	8x30	285	5.55	1.44	222	0.45	493
	8x60	507	6.00	1.33			
3	8x30	445	4.63	1.73	259	0.52	498
	8x60	704	5.15	1.55			
4	8x30	534	4.17	1.92	367	0.53	692
	8x60	901	4.70	1.70			

Среднее значение коэффициента жесткости составляет $C = \delta P / \delta h = 562 \text{ кН/мм}$. Практически это означает, что при общепринятом 10% -ном колебании усилия горячей прокатки заготовок медных шин или коллекторных полос шириной до 53 мм, составляющим 200 кН, отклонение толщины проката от номинала будет изменяться в пределах

$$\frac{\pm 0,1 \times 200}{562} = \pm 0,036 \text{ мм.}$$

Аналогичные сведения по жесткости одной из клеток 350 стана приведены в табл. 3.5 с единственным отличием от предыдущих опытов, заключающемся в том, что в эксперименте были использованы не две, а три полосы различной ширины.

Таблица 3.5

Определение жесткости клетки 350

Номер опыта	Размеры сечения заготовок	Усилие прокатки	Конечная толщина полосы	Коэффициент обжатия	Разность между усилиями прокатки	Разность между толщинами полос	Коэффициент жесткости клетки
	$h_0 \times b_0$, мм	P, кН	h_1 , мм	$1/\eta$	δP , кН	δh , мм	$C = \delta P / \delta h$, кН/мм
1	9x35	275	7,43	1,21	127	0,22	577
	9x60	402	7,65	1,18	343	0,38	902
	9x100	618	7,81	1,15	216	0,16	1350
2	9x35	436	6,20	1,45	224	0,25	898
	9x60	660	6,45	1,40	538	0,53	1015
	9x100	974	6,73	1,34	314	0,28	1121
3	9x35	750	4,55	1,98	365	0,40	913
	9x60	1115	4,95	1,82	850	0,85	1000
	9x100	1600	5,40	1,67	489	0,45	1087

Среднее значение коэффициента жесткости составляет $C = \delta P / \delta h = 991 \text{ кН/мм}$. При соответствующем колебании усилия прокатки самых широких заготовок коллекторных полос из БрКд1, равного 700 кН, отклонение толщины проката от номинального значения составит

$$\frac{\pm 0,1 \times 700}{991} = \pm 0,071 \text{ мм.}$$

1. Результаты экспериментального и теоретического исследований процесса прокатки клиновидных профилей позволили сформулировать следующие закономерности.

1.1. Для определения интегральных характеристик процесса прокатки клиновидного профиля можно с успехом использовать формулы, полученные для простого случая прокатки. В частности, в сопоставимых условиях коэффициент вытяжки при прокатке клина практически не отличается от коэффициента вытяжки при прокатке прямоугольника.

1.2. Для исключения чрезмерного искривления проката в горизонтальной плоскости (появления серповидности) при прокатке прямоугольной полосы на клиновидную следует избегать умеренных обжатий и прокатку вести с коэффициентом высотной деформации не ниже 1,6...1,8, если позволяют возможности оборудования и пластические свойства деформируемого металла.

1.3. Прокатка круглой заготовки обеспечивает получение клиновидного профиля с меньшей кривизной, чем прокатка прямоугольной заготовки.

1.4. Для минимизации тенденций к поперечному смещению (боковому уgonу) полосы на входе в валки и ее изгибу в горизонтальной плоскости (серпению) на выходе из валков и снижения тем самым достигающего высоких значений давления металла на проводки (во избежание образования на полосе волнистости) необходимо обеспечить соблюдение условий ровного входа полосы в валки и ровного выхода полосы из валков. Снижению влияния этих тенденций способствуют те же обстоятельства, которые ведут к увеличению уширения, а именно: приблизиться к названным условиям тем проще, чем толще прокатываемая полоса и больше ее обжатие (следовательно, меньше разница в обжатиях по толстой и тонкой кромкам), чем меньше угол клиновидности, чем больше диаметр валков и соответственно длиннее очаг деформации.

Задача полосы перпендикулярно плоскости осей валков (ровный вход) не является наилучшим вариантом; для стабильного входа заготовки в валки целесообразна ее задача под углом (косой вход). Предложена инженерная методика расчета формоизменения, учитывающая условия одновременного захвата по всей ширине заготовки и ровного выхода полосы из валков.

1.5. К внедрению рекомендована схема прокатки с формированием клиновидного профиля из прямоугольной заготовки в двух последних клетях непрерывной группы, причем в чистой клетке прокатку полосы клиновидного сечения следует проводить с равномерным по ширине обжатием.

1.6. Во избежание значительной волнистости на промежуточном раскате и на готовой горячекатаной полосе желательно, чтобы соотношение сторон прямоугольного профиля, задаваемого в калибр клиновидной формы, не превышало 5...6.

2. Экспериментально-лабораторное исследование системы калибров круг-гладкая бочка-круг при прокатке свинцовых и меднокадмиевых (вгорячую) образцов показало следующее.

2.1. Плоские раскаты, полученные при прокатке круга на гладкой бочке, имеют в поперечном сечении профиль с дугообразными боковыми гранями, т.е. по конфигурации они приближены к плоскоовальным полосам, получаемым в ручьевых валах.

2.2. Из плоских раскатов, полученных плющением круга в гладких валах, прокатаны нормально оформленные круглые профили с качеством, удовлетворяющим условиям их дальнейшей обработки волочением до готовых размеров. Сваливания раскатов в круглых калибрах не наблюдалось при соотношении осей плоского овала до 4,5, что демонстрирует их хорошую устойчивость.

2.3. Максимальные суммарные вытяжки (на уровне 2,4...2,5), достигнутые за два прохода от круга к кругу, свидетельствуют о достаточно высокой вытяжной способности калибровки. Вместе с тем для системы характерна неравномерность распределения вытяжек по проходам: коэффициент вытяжки в круглом калибре в 1,15...1,20 раза превышает коэффициент вытяжки на гладкой бочке.

3. Расчетно-экспериментальным методом, основанном на холодной прокатке на гладкой бочке двух полос одинаковой толщины, но существенно (в несколько раз) различающейся ширины при одном и том же межвалковом начальном зазоре, с инженерной точностью определены коэффициенты жесткости рабочих клеток 350 (990 кН/мм) и 300 (560 кН/мм). Практически это означает, что при колебаниях усилия прокатки в пределах 10% отклонения толщины проката от номинальных значений в самых тяжело нагруженных клетях составят 0,071 мм (клеть 350) и 0,036 мм (клеть 300), что вполне удовлетворяет условиям последующей обработки проката.

4. ОСВОЕНИЕ ПРОКАТКИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ, КЛИНОВИДНЫХ И КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ И ПОЛУЧЕНИЕ ИЗ НИХ ХОЛОДНОТЯНУТЫХ ИЗДЕЛИЙ

4.1. Освоение производства полосовых профилей

4.1.1. Технологические режимы прокатки

Как уже было отмечено, для всех групп сортамента стана разработаны калибровки, удовлетворяющие общему условию - обеспечить гибкую технологию прокатки изделий широкого сортамента, выпускаемых малыми партиями, с минимальными переналадками стана и использованием простой проводковой арматуры.

В 1978 г. ПНС 250 вошел в строй действующих; были выпущены промышленные партии заготовок медных шин толщиной 7...15 мм и шириной 62...122 мм с окончанием их прокатки в НГ 350, резкой летучими ножницами на мерные длины и уборкой с помощью поперечного транспортера-холодильника. По результатам прокатки не было обнаружено никаких серьезных отклонений от расчетного варианта режимов прокатки: захват раскатов во всех проходах был устойчивым, заполнение калибров ОК 500 и уширение полос на гладкой бочке в НГ 350 мало отличались от рассчитанных.

Вместе с тем при отсутствии на стане САРН и возникавшем по этой причине рассогласовании скоростей по клетям НГ, которое порождало утяжку полос по ширине, прокатку необходимо было проводить с серьезными ребровыми обжатиями, возможными, как подтвердила последующая практика, только в горизонтальной клетю. В начале освоения прокатки для стабилизации ширины полосы пытались использовать кромочную (вертикальную) клетю, установленную перед седьмой предчистовой клетью НГ 350 (см. рис. 1.1). Однако при назначении в ней обжатия на уровне всего 2,5...3,0 мм клетю, снабженная двигателем мощностью 25 кВт, останавливалась, полосы забуривались, стан простаивал. И действительно, расчет показал, что номинального усилия, развиваемого кромочной клетью (10 кН), достаточно для обжатия по ширине гладкими валками горячей медной полосы толщиной, например, 8 мм лишь на 2,5 мм.

Слабость клетки усугублялась тем, что кромки формировались не на гладкой бочке, а в ребровых калибрах, прокатка в которых происходит с некоторым стеснением металла, сопровождающимся повышением усилия. Соответственно боковые грани задаваемых в кромочную клетю полос еще большей толщины (10...15 мм) обжимались еще меньше, а при прокатке полос из кадмиевой бронзы, отличающейся от меди более высоким сопротивлением деформации, сколько-нибудь значительного

обжатия кромок не удалось достичь совсем. Только после реализации технологической схемы с применением ребровых калибров, нарезанных на валках горизонтальной клетки, удалось осуществить стабильный процесс прокатки заготовок медных шин.

Наряду с указанными, дополнительные трудности возникли при промышленном опробовании прокатки заготовок коллекторных полос, которую вначале также пытались осуществить без использования ребровых калибров горизонтальной клетки. Прокатка на гладкой бочке без обжатия боковых кромок с деформацией только по толщине прессованной заготовки из БрКд1, имеющей, в отличие от заостренного медного вайербарса, заторцованные концы и повышенные в сравнении с ним прочностные свойства, практически в 100% случаев приводила к образованию грубых трещин на переднем и заднем торцах раската. Полосы с таким дефектом забуривались в проводковой арматуре НГ 350 задолго до подхода к первой кромочной клетки. При переходе на схему прокатки с применением ребровых проходов (в горизонтальной клетки) растрескивание прекратилось, и качество получаемых горячекатаных заготовок стало удовлетворять требованиям ТУ.

Если учесть еще то обстоятельство, что раскат после плющения в гладких валках имеет выпуклые боковые грани ⁸, то становится ясной практически полная функциональная непригодность кромочных клеток, заставившая вывести их с линии прокатки. К тому же по проекту крайне неудачно выбрано место для второй кромочной клетки, установленной за НГ 350 (см. рис. 1.1), так как формирование в ней кромок готовых медных полос нецелесообразно по вполне очевидной причине (см. п.3 подраздела 1.2), а оформление в калибрах этой клетки кромок клиновидного профиля просто неосуществимо.

В последующем был освоен промышленный выпуск заготовок медных шин общим количеством 30 типоразмеров, в том числе так называемых узких шин шириной 25...40 мм, прокатка которых заканчивается в НГ 300, уборка их осуществляется посредством напольной моталки, формирующей плоский бунт, с немедленной его замочкой (с помощью пальцевого транспортера) в воде для предотвращения интенсивного окалинообразования.

⁸ На практике выпуклость боковых граней (бочкообразность) была значительна не только при плющении прутка (см. подраздел 3.2), но и при плющении прямоугольника: так, при волочении горячекатаной прямоугольной заготовки, ширина которой (по бочке) превышала на 2 мм ширину готовой медной шины, у последней получали неоформленные боковые грани, в связи с чем эту разницу по ширине увеличили с 2 до 4 мм.

Применительно к узким шинам был принят и успешно проверен в работе вариант прокатки с использованием в качестве промежуточных заготовок круглых профилей diam. 22,5; 26 и 30 мм, получаемых в НГ 350. Такое техническое решение - плющение круглых прутков в гладких валках в условиях непрерывного стана - на заводах цветметобработки ранее не применялось. Ориентированное на технологическую гибкость, это решение базируется на максимальной универсальности и простоте калибровки валков ПНС 250, предназначенного для многосортamentной прокатки заготовок электротехнических профилей.

Была поставлена задача расширить сортамент узких медных шин и освоить прокатку в НГ 300 заготовок шириной 33...53 мм из промежуточных круглых профилей, прокатываемых в НГ 350. Однако нестабильный скоростной режим НГ стана, особенно вредный для проката мелких сечений, сводил на нет все старания бригад электриков и прокатчиков настроить на нормальную работу чистовую группу 300. Так, например, при прокатке заготовки сечением 7х50 мм требуемую ширину полосы 50 мм получали только в средней части ее длины, а передний и задний ее концы (длиной до 8...10 м) имели ширину 54...55 мм. После прокатки в ребровом калибре, нарезанном на валках клетки 2-300, полоса имела ровные (без бочкообразности) боковые грани, но применение ребрового прохода не компенсировало полностью разноширинность, порождаемую неконтролируемым межклетевым натяжением. Для получения из таких горячекатаных заготовок готовых медных шин приходилось использовать экономически неоправданную технологию с двумя проходами волочения.

Негативное влияние неконтролируемого натяжения смягчили применением ряда мер.

1. Ужесточен режим обжатий в НГ 350, и в ребровые калибры клетки 2-300 стали поступать более высокие полосы, соответственно повысились коэффициенты их ребрового обжатия.

2. Предпоследняя в НГ 300 клеть 3-300 переведена на работу в транспортном режиме; вследствие этого более чем в 1,5 раза увеличена длина раската между чистовой клетью 4-300 и предчистовой 2-300, тем самым создана предпосылка для прокатки с образованием петли.

3. За счет увеличения межклетевого промежутка уменьшен угол наклона ребрового калибра (рис. 2.7, а), который одновременно с обжатием выполняет кантовку полосы в пластовое положение, благодаря чему также снизилась нестабильность прокатки.

В связи с освоением на ПНС 250 прокатки заготовок медных шин были достигнуты определенные технико-экономические результаты: взамен прессования заготовок из слитков собственного производства,

что приводило к повышенной себестоимости продукции из-за невысокого выхода годного и низкой производительности процесса прессования, их стали получать прокаткой из крупных вайербарсов внешней поставки.

Освоение восьми типоразмеров клиновидных заготовок (по технологической схеме, представленной в подразделе 2.3) из бронзы БрКд1 шириной 83...104 мм и углом профиля 1°08'...2°40' было ориентировано на использование для их предчистовой и чистовой прокатки двух последних из восьми клетей НГ 350. Режимы обжатий в этих проходах, в которых формировали клиновидную заготовку из прямоугольной, в соответствии с результатами экспериментов и теоретического анализа стремились умеренно форсировать, одновременно достигая тем самым определенного уровня технологической гибкости, а именно: снижения числа комплектов специализированных валков, предназначенных для прокатки собственно клиновидной заготовки; приближения процесса прокатки к выполнению условия одновременного захвата полосы по всей ширине и ровного выхода ее из валков; подавления тенденции к серпению полосы и уменьшения в связи с этим ее давления на выводные проводки.

Однако нестабильный скоростной режим работы стана в начальный период его освоения, сбой в работе электрооборудования вынудили скорректировать первоначальный вариант технологии, согласно которому формирование клиновидной заготовки из прямоугольной планировали осуществлять в двух последних клетях НГ 350. В частности, при прокатке в клетки 7-350 прямоугольной заготовки на клиновидную с обжатием 50...55% двигатель клетки часто останавливался, хотя фактические момент и усилие прокатки были значительно меньше допустимых. В конечном итоге решено было формировать клиновидный профиль в трех последних клетях группы, уменьшив нагрузки на двигатели в отдельных клетях. При этом практически для всех промежуточных профилей, близких по углу клиновидности, в подготовительной и предчистовой клетях использовали один комплект валков, на которых нарезали калибры с фиксированными углами (см. например, рис. 2.8); тонкую настройку угла клиновидности калибров (до 0,5°) осуществляли перекосом валков за счет подкладок под подушки.

Прокатку в чистовой клетке проводили на двухконусных валках с фиксированными углами (рис. 4.1), охватывающими весь диапазон углов и толщин клиновидных заготовок. Однако участок на бочке валка, предназначенный для прокатки меднокадмиевой заготовки самого массового профиля (3,17х6,12х101 мм), подвергался значительно более интенсивному износу, нежели смежные, в связи с чем возникала необходимость переточки всего валка. Было принято решение нарезать для прокатки заготовки этого профиля четыре одинаковых калибра.

Отступление в данном случае от принципа универсальности калибровки было продиктовано стремлением сократить затраты на переточку, перевалку и настройку валков.

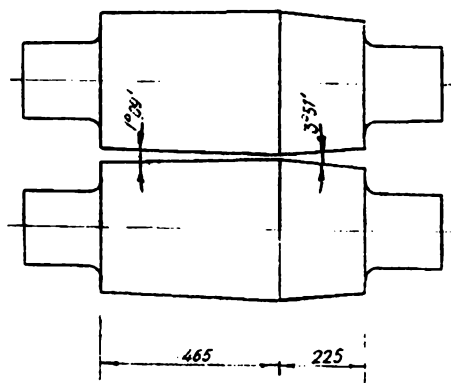


Рис.4.1.Двухконусные валки чистовой клетки 8-350

После травления горячекатаных заготовок из них путем 2–3-кратного волочения через составные волокни получали восемь позиций коллекторных полос обычной (4-й класс), повышенной (3а класс) и высокой (3-й класс) точности по ГОСТ 4134-75, в том числе самый массовый профиль с размерами поперечного сечения 3,17х6,12х101 мм и углом 1°40'.

На горячекатаных заготовках отсутствовали серповидность и волнистость, толщина и угол профиля находились в регламентированных пределах. Однако неконтролируемое межклетевое натяжение раската, особенно в начальный период освоения, доводка калибровки валков и арматуры стана, а также нестабильный режим нагрева заготовок перед прокаткой, в значительной мере обусловленный неудачной конструкцией нагревательной печи (см. п. 1.3.3), приводили к недопустимым по технологии колебаниям ширины прокатанных полос, равным 4...5 мм. Более того, отсутствие в этот период на пультах управления приборов точного указания скорости каждой клетки (см. подпункт 1.3.2.6) приводило к такому рассогласованию скоростей по клетям, которое порождало разноширинность по длине полосы до 15...20 мм. После приобретения и монтажа новой приборной оснастки (цифровых вольтметров Ф210-05/02) и усовершенствования нагревательной печи разноширинность горячекатаных заготовок снизилась до уровня 2...3 мм, но все же являлась причиной низкого выхода годных коллекторных полос, поскольку после 2-кратного волочения таких заготовок полосы

часто не укладывались в допуск по высоте профиля, равный, согласно ГОСТ 4134-75, -0,8...-1,0 мм. Прокатывать заготовку повышенной ширины и тем самым увеличивать обжатие при волочении означало бы повысить обрывность.

Постепенно по мере накопления опыта эксплуатации стана и внедрения конструкторских и технологических усовершенствований процесс прокатки стабилизировали, и разноширинность горячекатаных заготовок как медных шин, так и коллекторных полос снизилась до 1...2 мм. Вероятно, можно считать, что возможности более точной настройки скоростного режима НГ стана исчерпаны.

4.1.2. Особенности волочения коллекторных полос

Освоение ПНС 250 поставило перед волочильным производством задачу обработки горячекатаной меднокадмиевой заготовки, отличающейся от прессованно-холоднокатаной по ряду параметров. Дело в том, что коллекторные полосы повышенной и высокой точности (КВТ) ранее получали прессованием круглого слитка в двухочковую матрицу с последующей однопроходной прокаткой на стане 350 (конструкции ВНИИМЕТМАШ), отжигом и двухпроходным волочением через составные волокна с твердосплавными вкладышами.

Поскольку после прокатки отжиг не производят, горячекатаная заготовка получается более жесткой по сравнению с применявшейся ранее прессованно-холоднокатаной заготовкой, которую перед волочением подвергали отжигу. Травление горячекатаной заготовки не устраняло полностью имевшийся в этот период такой дефект, как вкатанная окалина. Все это вызывало значительные колебания усилий волочения и давления на волоку и приводило в ряде случаев к поломке твердосплавных (ВК8) вкладышей и растрескиванию стальных обойм составных волок.

Для устранения указанных недостатков и повышения стойкости волочильного инструмента было предпринято следующее.

1. Изменены углы волочильного канала: угол рабочего конуса увеличен с 6 до 8°; угол входной распушки также повышен с 3 до 8°, т.е. входная распушка по существу ликвидирована. Это позволило расширить диапазон рабочих обжатий и устранить возникавшее иногда скальпирование кромок клиновидного профиля при волочении слишком широкой заготовки.

2. Смещен в сторону рабочего конуса калибрующий пояс, т.е. длина выходной распушки увеличена с 2 до 8...10 мм. Это повысило прочность вкладышей, устранило их частое растрескивание и подняло стойкость обойм.

3. Интенсифицирована промывка водой под давлением горячекатаной заготовки в процессе ее травления, что оказало положительное влияние на окислительное удаление и повысило износостойкость вкладышей волок.

Характерным видом износа вкладыша являлась местная выработка поверхности рабочего конуса в виде канавки по контуру входа металла в рабочий конус волокни. Однако выход из строя составной волокни редко происходил по этой причине, так как изношенные таким образом вкладыши легко поддавались реставрации, после которой вновь устанавливались в обойму и служили следующую кампанию. Как правило, вкладыш выбраковывался из-за трещин, развивающихся на всю его толщину, и в этом случае он не подлежал реставрации.

При нормальном ходе технологического процесса прокатки, травления и волочения, а также высоком качестве твердого сплава ВК8 стойкость вкладышей до реставрации составляла 250...300 т протянутого металла, после реставрации - столько же. Это позволило получать с помощью одного комплекта инструмента до полугодичного объема выпуска коллекторных полос каждого из следующих освоенных размеров, мм: 3,64x4,81x80 - КВТ; 2,04x4,20x93 - КВТ; 3,30x5,81x93 - КВТ; 2,19x4,55x94,5 - КВТ; 3,91x6,04x97 - обычной точности; 3,17x6,12x101 -КВТ.

В тех же условиях эксплуатации стойкость монолитных твердосплавных волок составляет 50...60 т, причем реставрации они не подлежат.

Изготовление вкладышей составных волок организовано в фильерной мастерской цеха, где установлен плоскошлифовальный станок модели 3Г71 с синусными тисками, используемыми только при чистовом шлифовании. Обработка ведется алмазными кругами марки АСП.

Для получения, с учетом качества проката, годных холоднотянутых полуфабрикатов с наименьшими потерями металла и минимальными трудозатратами внесли изменения в первоначальный вариант технологии: несколько увеличили номинальную ширину горячекатаной заготовки и ввели дополнительное предчистовое волочение с небольшой вытяжкой (на уровне 1,1...1,15), но без промежуточного отжига. Как показала практика, при стабильной ширине горячекатаных заготовок коллекторные полосы отвечали требованиям ГОСТа и при двухпроходном волочении.

Промышленные партии коллекторных полос после волочения их из клиновидных заготовок отправлены потребителям и успешно ими использованы по действующей технологии штамповки ламелей и сборки коллекторов электрических машин.

4.1.3. Техничко-экономические результаты освоения прокатки полѳосовых профилей

Как указывалось в подразделе 2.3, технологической схемой прокатки полѳос в НГ 350 и 300 предусмотрено сочетание проходов на гладкой бочке и в ребровых калибрах, нарезанных, ввиду отсутствия вертикальных клетей, на валках клетей горизонтальных. Вследствие этого прокатку проводили с кантовками полѳосы между клетями, поочередно на ребро и на пласт. Это несколько усложняло технологию, однако при отсутствии в НГ 350 и 300 вертикальных клетей система гладкая бочка-ребровой калибр-гладкая бочка, обладая определенной гибкостью, оказалась оптимальной: она позволяла быстро осуществлять переход с профиля на профиль при использовании одного комплекта валков и простой проводковой арматуры.

Прокатка клиновидных меднокадмиевых полѳос высокоответственного электротехнического назначения осуществлена в отечественной практике впервые. Трудности при разработке калибровки валков и ее практической реализации были порождены тем, что из-за значительной ширины полѳосы пришлось прокатывать в пластовых проходах. При формировании клина из прямоугольной заготовки деформация по ширине полѳосы неравномерна, следствием чего, как отмечали, являются тенденции к поперечному смещению полѳосы в сторону толстой кромки клина и ее серпение из-за преобладающей вытяжки по тонкой кромке. Эти тенденции ослабевали, но продолжали действовать при формировании клиновидного профиля из клиновидной заготовки. Для предотвращения этих явлений были установлены жесткие вводные и выводные проводки, способные противостоять значительным усилиям со стороны прокатываемой полѳосы.

Стабильный процесс прокатки клиновидных профилей был обеспечен использованием в подготовительной, предчистойой и чистойой клетях валков с ручьями, образующими клиновидные калибры. Установка необходимых калибров на линию прокатки осуществлялась поперечным перемещением клетей.

Техничко-экономические преимущества освоения на стане прокатки полѳосовых профилей, в частности клиновидных из кадмиевой бронзы, вытекают из того, что согласно новой технологической схеме функции прессования ограничены получением крупногабаритной меднокадмиевой заготовки сечением 95х95 мм взамен тонкой клиновидной, а окончательно клиновидная полѳоса под волочение формируется посредством более производительной прокатки. В результате освоения технологии прокатки клиновидных заготовок были достигнуты следующие показатели.

1. Высокая производительность прессования (4,3 т/ч) благодаря повышенной до 230 кг массе слитка, увеличенному в пять раз сечению заготовки, высокой стойкости прессового инструмента (главным образом матриц) вследствие снижения коэффициента вытяжки и приемлемости значительных допусков (+5...-1 мм) на поперечные размеры заготовки.

2. Производительность прокатки коллекторной заготовки на ПНС 250 составляет 20 т/ч, в то время как производительность при прессовании ее через двухочковую матрицу едва достигает 3,2 т/ч.

3. Получение с прокатного стана заготовки с формой профиля и размерами сечения, близкими к профилю и сечению холднотянутой коллекторной полосы, позволило сократить трудоемкий волочильный передел на 1-2 протяжки.

4. Выход годного по новой технологии увеличен на 10...12%.

5. Разгружено прессовое оборудование, снята часть заказов с морально и физически устаревшего проволочно-прокатного стана.

4.2. Разработка и реализация технологии прокатки круглых профилей и медной катанки

Как уже было отмечено, ПНС 250 введен в эксплуатацию в 1978 г. За минувшие годы освоен широкий сортамент заготовок под волочение профилей электротехнического назначения: меднокадмиевых коллекторных полос клиновидного и медных шин прямоугольного сечения в концах (после НГ 350) и бунтах (после НГ 300); при этом НГ 250 и ее уборочные средства не были задействованы.

В конце 80-х годов на заводе было организовано производство промышленных партий холднотянутых круглых медных прутков, заготовками для которых служили горячекатаные круглые профили, выпущенные со стана 250. Однако последние отличались невысоким качеством по сравнению с прессованными, главным образом вследствие вкатанных стружки и окалины⁹, отсутствия на стане САРН, грубого нарушения схемы прокатки в ОК 500, которое заключалось в прокатке вайербаров уменьшенного сечения массой 85 кг в калибрах, предназначенных для прокатки вайербаров повышенного сечения массой 120 кг, и которое приводило к их сваливанию в первом же калибре ОК 500 со всеми вытекающими из этого негативными последствиями. Производство круглых медных прутков с использованием ПНС 250 было прекращено.

⁹ Мероприятия по повышению качества изделий, описанные в пятом разделе работы, были реализованы позднее.

В 1992 г. была начата работа по освоению промышленного производства катанки диам. 8 мм¹⁰. Согласно одному из требований ТУ (ГОСТа на медную катанку нет) предельные отклонения от ее номинального диаметра составляют +0,3...-0,4 мм (1-й и 2-й классы точности) и +0,4...-0,6 мм (3-й класс), в то время как проектом стана предусматривалось получение мелкосортного проката с точностью $\pm 0,5$ мм.

Первые попытки получить катанку по технологической схеме, представленной в подразделе 2.4, показали, что осуществить стабильный процесс прокатки с участием всех групп клетей, а также уборку проката моталкой невозможно¹¹. Об этом свидетельствовали многочисленные обрывы и застревания раската в НГ 250, а также выход из строя моталок и вспомогательных механизмов. В связи с этим при опытной отладке технологии катанку из чистовой клетки №19 направляли через трубу на пол цеха и после раскладки ее в длину и естественного охлаждения проводили осмотр, измерение, отбор образцов; таким же образом поступали при необходимости с полосами промежуточных сечений.

Характер выявленных дефектов катанки побудил искать источники их происхождения не только в проволоночной группе, но и значительно ранее - в состоянии промежуточных круглых калибров диам. 14 и 17 мм (в НГ 300), диам. 22,5; 30 и 40 мм (в НГ 350).

Работа на первой стадии осложнялась следующими обстоятельствами, порождающими низкое качество катанки.

1. Круглые профили (наименьший из них диам. 22,5 мм) использовались до начала освоения прокатки катанки в качестве промежуточных для получения заготовок медных шин. Требования к точности их сечения, естественно, были понижены, так как, во-первых, кроме плющения в гладких валках были предусмотрены проходы в ребровых калибрах и, во-вторых, заготовки использовались для волочения медных шин в собственном производстве, где при необходимости можно скорректировать технологию, включая увеличение числа протяжек. Поэтому, в частности, круглые калибры были нарезаны в упрощенном варианте - без выпусков.

¹⁰ В работе участвовали мастер стана 250 А.В. Миллер, начальник техбюро цеха Г.И. Хрунов, начальник отделения ЦЗЛ к.т.н. В.П. Котельников.

¹¹ Информация, полученная при проверке в холостых режимах НГ 250, ее уборочных средств и других механизмов хвостовой части стана, оказалась практически бесполезной: лишь при последующей их работе под нагрузкой выявились многочисленные недоработки проектирования, изготовления и монтажа основного и вспомогательного оборудования.

2. Трудно было рассчитывать на сколько-нибудь стабильную работу проволочной группы из-за отсутствия САРН и средств регулирования работы двигателей, а также вследствие грубых ошибок, допущенных при изготовлении и монтаже проводящих устройств, просчетов при проектировании моталок и т.д.

3. Частые и продолжительные перерывы процесса прокатки при застреваниях раската и настройках приводили к длительному пребыванию вайербарсов в печи, в результате чего на них образовывался толстый слой окалины. Поскольку толщина окалины, резко отличающейся по свойствам от основного металла, оказывает существенное влияние на условия контактного трения и, соответственно, на значения уширения, то это приводило к нестабильности размеров промежуточных полос и готового профиля; особенно ощутимо это проявлялось на мелких сечениях.

Вследствие указанных обстоятельств не удавалось обеспечить требуемое качество катанки: было обнаружено, что формоизменение металла сопровождается значительным переполнением круглых калибров в начале и в конце раската, а затем и появлением закатов на готовом прокате, утяжкой профиля по ширине в серединной по длине части полосы, чрезмерными отклонениями размеров профиля от требуемых по ТУ.

Выявленные в результате первых опытов причины неудачных попыток прокатки катанки укрупненно разделили на две группы:

- неудовлетворительное состояние механического и электрического оборудования НГ 250, проволочных моталок и в целом хвостовой части стана;

- острая необходимость в совершенствовании калибровок валков всех трех НГ стана.

Детальное рассмотрение мероприятий, позволивших ликвидировать первую группу причин, изложено в первом разделе книги; далее описаны в основном технологические аспекты решения проблемы получения катанки надлежащего качества.

С учетом изложенных в пунктах 1-3 обстоятельств до июня 1993 г. включительно прокатку во всех круглых калибрах, не имеющих выпусков, вынуждены были проводить с существенным незаполнением из-за опасности вытекания металла в зазор и образования лампасов; при этом значительно усложнилась настройка стана. Например, если появлялась необходимость уменьшить сечения полос в НГ 250, то с целью корректировки промежуточных профилей прокатку в круглых калибрах НГ 350 проводили без рабочих зазоров, и сечения пережатых кругов искажались, превращаясь по существу в овальные. Фактическое уширение таких кругов, прокатываемых на гладкой бочке, и

соответственно обжатие и уширение плоскоовальных полос, прокатываемых в круглых калибрах, отличались от расчетных. Пережатые плоскоовальные полосы имели повышенное, против расчетного, отношение осей и при прокатке в круглых калибрах проявляли тенденцию к потере устойчивости в виде одностороннего выпучивания или сваливания, что создавало опасность образования закатов на круглых профилях.

Все это приводило к невысокому качеству поверхности проката, нестабильности размеров по его длине и значительным отличиям формы сечения катанки от правильного круга: фактические отклонения от номинального диаметра составляли $\pm 1,0$ мм.

Для устранения перечисленных недостатков прежде всего перешли от питания через ртутные преобразователи на тиристорное управление работой всех электроприводов, внедрили тонкую регулировку их скоростных режимов¹², модернизировали моталки и вспомогательные механизмы хвостовой части стана (см. подраздел 1.3), провели ревизию всех проводящих устройств и валковой арматуры. Кроме того, предприняли радикальные меры по совершенствованию калибровки валков и изменению схемы прокатки катанки.

Были рассмотрены следующие направления дальнейшей работы по совершенствованию процесса прокатки.

1. Повысить качество катанки до требуемого уровня без изменения схемы калибровки валков, ориентируясь, в основном, на доработку механического и электрического оборудования всех непрерывных групп и вспомогательных механизмов. Технологические усовершенствования при этом сводятся к наведению порядка с размерами и формой калибров.

2. Изменить схему прокатки: ввести в НГ 250 «смягченную» систему калибров овал-ребровой овал-овал-круг (см. подраздел 2.4). В соответствии с этой системой использовать только две пары клетей в НГ 250, а именно 14В+15 и 18В+19, чтобы за счет исключения из процесса прокатки второй пары 16В+17 «расчистить» промежуток длиной 7,7 м между клетями 15 (3-й с конца проход) и 18В (2-й с конца проход), использовать этот промежуток для образования петли полосы и тем самым избавиться от неконтролируемого натяжения. В качестве подстраховочного рассмотрели запасной вариант, примыкающий ко второму направлению; его суть была изложена в подразделе 2.4.

Несмотря на указанные трудности, работа по первому направлению позволила с марта 1993 г. организовать выпуск промышленных партий медной катанки в нарастающих объемах: март - 85 т, апрель - 157 т, май - 265 т.

¹² В работе участвовал сотрудник ПО «Уралэнергоцветмет» М.В. Пьянков.

Работу по второму направлению начали с уточнения диаметров круглых калибров, запланированных к размещению на валках НГ 350. С этой целью определили фактические площади «пережатых» круглых профилей диам. 40, 30 и 22, 5 мм и пришли к выводу, что их следует заменить равновеликими кругами диам. 36, 27 и 20,5 мм соответственно.

Согласно уточненной технологической схеме (табл. 4.1 и рис. 4.2) получали промежуточные круглые профили диам. 36, 27, 20,5 и 17 мм (в НГ 350), диам. 14 и 11,5 мм (в НГ 300); прокатку в НГ 250 проводили с устойчивым формированием петли между парами клетей 14В+15 и 18В+19.

При анализе табл. 4.1 обращает на себя внимание исключительно высокий коэффициент вытяжки (3,22), достигаемый за два прохода при прокатке квадрата 60х60 мм с закругленными углами (сечением 3273 мм²) на круг диам. 36 мм (сечением 1017 мм²). Наряду с фактическими суммарными за два прохода коэффициентами вытяжки на уровне 1,48 в НГ 300 и до 1,78 в НГ 350 это свидетельствует о немалой вытяжной способности системы круг-гладкая бочка-круг и об

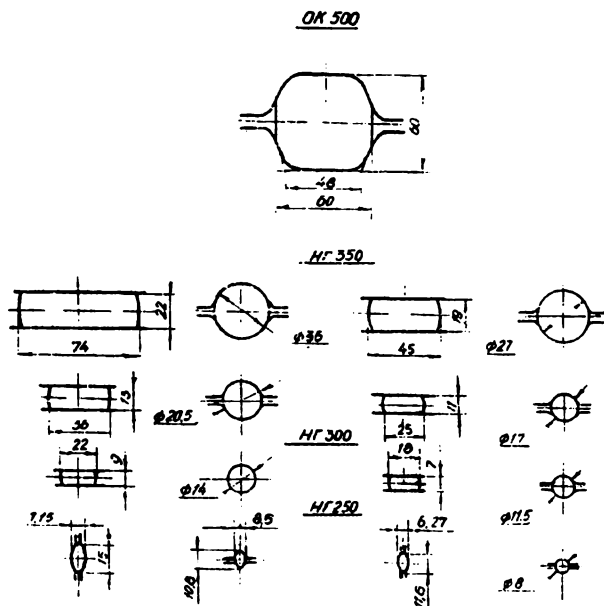


Рис.4.2. Технологическая схема прокатки медной катанки диам. 8 мм

устойчивости прокатываемых в круглых калибрах довольно высоких, плоскоовальных полос (с соотношением осей 2,44...2,57 в НГ 300 и 2,27...3,36 в НГ 350) - в частности при горячей прокатке меди.

Реализация в полной мере прокатки по уточненной технологической схеме с интенсифицированным режимом обжатий в НГ 350 и 300 и смягченным в группе 250 была проведена с наименьшими, по сравнению с другими вариантами, затратами, поскольку схема отвечала требованиям технологической гибкости, а именно:

Таблица 4.1

Режим прокатки медной катанки диам. 8 мм по уточненной схеме

Группа клетей	Номер клетки	Габаритные размеры сечения полосы, мм		Коэффициент вытяжки за проход/за два прохода	Частота вращения валков, об/мин
		h	b		
ОК 500	1	60	60		
НГ 350	2	22	74	2,120	13,0
	3	Ø36	Ø36	1,520/3,220	21,8
	4	19	45	1,244	24,6
	5	Ø27	Ø27	1,430/1,780	38,0
	6	13	36	1,240	43,6
	7	Ø20,5	Ø20,5	1,400/1,730	65,0
	8	11	25	1,170	72,5
	9	Ø17	Ø17	1,240/1,450	94,5
НГ 300	10	9	22	1,180	124,0
	11	Ø14	Ø14	1,250/1,474	165,0
	12	7	18	1,190	191,0
	13	Ø11,5	Ø11,5	1,245/1,484	252,0
НГ 250	14В	Овал 15,0	7,15	1,290	393,0
	15	Ребровоец 10,8	овал 8,6	1,135/1,465	463,0
	16В	-	-	-	-
	17	-	-	-	-
	18В	Овал 11,6	6,27	1,215	571,5
	19	О8	О8	1,160/1,410	690,0

- предусмотрено минимальное количество впервые нарезаемых калибров;

- не возникло необходимости в изменении большей части проводковой арматуры;

- успешно использован имевшийся опыт работы по освоению ранее действовавшей схемы и режимов прокатки.

Производство по уточненной технологической схеме промышленных партий катанки, полностью удовлетворяющей требованиям третьего класса по точности и первого-второго классов по остальным параметрам согласно ТУ, было налажено с августа-сентября 1993 г. с выпуском 344 и 497 т соответственно и продолжается до настоящего времени при наличии заказов (режим работы односменный, скорость прокатки в чистовой клети - около 13 м/с).

От кабельных заводов - потребителей катанки получены положительные отзывы об уровне ее качества. В заключении, выданном институтом Унипромедь, г. Екатеринбург, указано: катанка по всем параметрам соответствует требованиям ТУ; горячая прокатка обеспечивает более глубокую проработку структуры металла по сравнению с процессом непрерывного литья и прокатки; это позволяет полученную катанку рекомендовать для волочения проволоки тонких сечений диам. 0,03...0,05 мм. Высокие пластические характеристики катанки были подтверждены также в собственном производстве при ее волочении без отжигов до диам. 0,3 мм, в то время как диаметр, до которого согласно ТУ катанка должна выдерживать технологическое испытание волочением, составляет 0,5 мм.

В связи с ситуацией, возникшей на рынке сырья в 1994 г. (нестабильность цен на вайербарсы, снижение их качества, неприемлемые по договорным отношениям с заказчиками сроки поставки слитков и др.), организовали производство вайербарсов из меди марок МО и М1 собственными силами, с использованием литейных мощностей завода. И хотя это решение явилось вынужденным, достигнуты высокие технико-экономические показатели. Из слитков с размерами сечения 100x100 мм, полученных вертикальным полунепрерывным литьем, прокатаны и сданы потребителям промышленные партии катанки диам. 8 мм общим объемом 53 т (по состоянию на декабрь 1994 г.). Заключение института Унипромедь, содержащее результаты испытаний катанки, прокатанной из слитков собственного производства, свидетельствует: катанка соответствует требованиям ТУ 16.К71-003-87 первого класса любого типа; по уровню пластичности она рекомендуется для скоростного волочения, в том числе проволоки малых диаметров; катанка может использоваться по любому назначению, включая производство эмалированных проводов.

По мере накопления опыта настройки ПНС 250 на прокатку катанки, модернизации механического и электрического оборудования стана и совершенствования технологии прокатки значительно сократились потери металла; постепенно повышался выход годного: от 70...72% в начальный период освоения прокатки катанки до 90%; в настоящее время выход годного равен 93%. Такой уровень можно было

бы признан приемлемым для мелкосортного стана, однако он все же недостаточно высок в сравнении, например, с морально и физически устаревшим линейным проволочным станом этого же завода, на котором при прокатке медной катанки диам. 7,2 мм выход годного достигает 97%¹³. На стане 250 «Камкабеля» выход годного также равен 97%.

Таким образом, недалеко до решения задачи поднять выход годного до уровня, типичного для давно отлаженных вариантов прокатки медной катанки. Для этого требуется реализовывать дополнительные мероприятия по совершенствованию электромеханического оборудования и арматуры ПНС 250, в частности установить устройство для образования петли проката между НГ 300 и НГ 250. Кроме того, выход на этот уровень безусловно обеспечивается при прокатке с использованием интенсивной калибровки, рассмотренной в конце подраздела 2.4. Что касается калибровки валков, в которой широко используются калибры системы круг-гладкая бочка-круг, то она представляется вполне уместной в условиях стана, ориентированного на производство не только катанки, но и других профилей в весьма широком сортаменте.

Опыт эксплуатации стана в режиме гибкой прокатки показывает, что несмотря на противоречивость категорий «гибкость» и «производительность», при использовании современных приемов обеспечения гибкости достигаются приемлемые технико-экономические показатели.

4.3. Роль и совершенствование арматуры ПНС 250

В процессе освоения на ПНС 250 прокатки различных профилей его арматура была подвергнута существенному усовершенствованию. Разнообразие принятых в отличие от проектных технических решений по арматуре предопределено необходимостью достижения функциональной пригодности арматуры в принципе (в начале освоения), подчинения ее концепции гибкости в условиях широкосортamentного производства (на последующих этапах).

¹³ В 1992 г., когда в стране возник острый дефицит медной катанки, а ПНС 250 не был готов к ее выпуску, на заводе использовалась еще одна альтернативная технология производства катанки (по существу - проволоки) диам. 8 мм. Согласно этой технологии, включающей литье круглых слитков, прессование заготовки диам. 10,2 мм, ее волочение на готовый профиль и светлый отжиг, выход годного составлял 71 % и не имел перспективы повышения по причинам, не требующим пояснений. Кроме того, в готовом изделии при хорошем качестве его поверхности и высокой точности профиля часто встречались внутренние дефекты литейного и прессового происхождения, обнаруживаемые лишь у потребителя. Сказанное стимулировало организацию производства медной катанки на ПНС 250.

В частности, в ходе работы установлено, что проводковая арматура клеток 6-350, 7-350 и 8-350, в которых из прямоугольной заготовки формируется клиновидный профиль, подвергается значительному силовому воздействию со стороны раската. Например, при прокатке в клетки 6-350 промежуточной заготовки из БрКд1 сечением 20х100 мм на клиновидную полосу с углом 4° при температуре 800°C и степени деформации 50% усилие бокового давления на выводную проводку со стороны клиновидной полосы, выходящей из валков, составляет около 100 кН. В этих условиях проводки не обладали достаточными прочностью и жесткостью и их пропуски отгибало полосой. Кроме того, линейки выводных проводок были расположены на удалении от плоскости выхода металла из валков, что затрудняло прием полосы проводкой, вызывая частые застревания. Арматуру подготовительной, предчистовой и чистовой клеток НГ 350 модернизировали: направляющие линейки проводок удлиннили, приблизив их к плоскости выхода полосы из валков; с целью усиления линеек вдвое увеличили их толщину; для уменьшения налипания прокатываемого металла линейки выполнили из нержавеющей стали вместо чугуна; с целью исключения строжки металла и последующего вкатывания стружки в прокат выводные проводки снабдили роликами.

Ниже указан ряд дополнительных изменений, внесенных в проектный вариант арматуры стана.

1. Вводная чугунная проводка, с помощью которой скантованная на ребро полоса задается в ребровой калибр клетки 2-350, испытывала значительное усилие со стороны полосы, что приводило к разрушению проводки. Материал и конструкцию проводки изменили: ее выполнили из листовой стали толщиной 15 мм и придали ей коробчатую форму со съемной верхней крышкой, которая крепится в коробке клином.

2. Задний конец раската оставался в выводной проводке, установленной после 1-го калибра ОК 500, полоса полностью не выходила на кантовальную доску, в связи с чем была парализована нормальная работа обжимной клетки. На выходной стороне проводки установили горизонтальный ролик, после чего задержки раската в проводке прекратились.

3. С целью повышения стойкости упростили конструкцию линеек вводной проводки 3-го калибра ОК 500.

4. Существенно изменили конструкцию вводной проводки перед 4-м калибром ОК 500. Чугунные направляющие линейки этой проводки плохо удерживали полосу, и она сваливалась, а сами линейки ломались. При модернизации с основания проводки срезали боковые щеки, удалили чугунные линейки, а на их место установили посредством сварки

стальные направляющие, переднюю часть которых выполнили по профилю рабочего вала. Это мероприятие позволило наладить устойчивую прокатку в ОК 500 и стабилизировать питание НГ 350 промежуточной заготовкой сечением 60х60 мм.

5. Для быстрой и точной установки по месту проводковых брусьев со смонтированными на них проводками (без участия электромостового крана) изготовлен простой по конструкции винтовой домкрат, позволивший резко облегчить условия труда и сократить длительность настройки.

6. Желоб, предназначенный для направления узких полос, выходящих из кантовочной роликовой проводки после чистовой клетки 4-300 к тянущим роликам для последующего рассева полос и их смотки, имел внутренний конический профиль и открытую верхнюю часть. При такой конструкции полоса либо забуривалась в узкой части желоба, либо вылетала через его открытую часть. В новом варианте желоб выполнили в виде закрытой сварной конструкции прямоугольного сечения со съемной крышкой; в направлении продольной оси он закручен на угол кантовки 90°. В результате достигнуто устойчивое направление полос к тянущим роликам, стабилизирован процесс уборки проката.

В связи с острой необходимостью немедленного реагирования на проблемы по арматуре, возникавшие в процессе освоения прокатки различных профилей, многие технические решения, реализованные по ходу работы в металле и использованные на стане, не нашли своего отражения в технической документации, поэтому в рамках следующего этапа работы по арматуре провели документирование большинства нововведений с выпуском рабочих чертежей. При этом были поставлены и решены следующие задачи.

1. Иметь полный комплект рабочих чертежей модернизированной арматуры с целью ее последующего (при необходимости) воспроизведения в металле.

2. Разработать этот комплект чертежей не только на базе уже внесенных изменений в действующую на ПНС 250 арматуру, но и с использованием многолетнего опыта совершенствования арматуры стана 250 завода «Камкабель» при прокатке медной катанки.

3. Повысить применительно к условиям механообрабатывающего производства завода технологичность изготовления и ремонтпригодность проводковой арматуры, а также ее работоспособность.

Выполнение этой работы привело к ряду дополнительных усовершенствований, изложенных ниже.

– Непрерывная группа 350: соответственно новому варианту калибровки для прокатки круглых профилей и катанки внесены изменения в рабочие чертежи пропусков и воронок; выпущена отсутствовавшая ранее документация на соответствующие детали пропусков; разработаны чертежи общих видов некоторых проводок.

– Непрерывные группы 300 и 250: изменена конфигурация элементов воронок с целью упрощения их сборки под сварку; для повышения устойчивости раскатов увеличены линейные размеры воронок (они удлинены на 15...20 мм в направлении зева валков); с целью повышения износостойкости воронок путем резкого снижения налипания на них меди рабочие поверхности воронок армированы полосами из нержавеющей стали марки X18H9T¹⁴; для повышения надежности работы изменена конструкция системы подвода охлаждающей воды к проводкам; для повышения работоспособности увеличены размеры подшипникового узла вводных роликов, установленных на входе в проводки.

1. Разработана технология производства и освоен выпуск промышленных партий более тридцати размеров медных шин, заготовки для которых получены прокаткой на ПНС 250: широких (50...120 мм) в концах и узких (25...50 мм) в бунтах. Технологическая гибкость их прокатки, базирующаяся на максимальной универсальности и простоте калибровки валков, достигнута за счет использования для прокатки узких шин в качестве промежуточных заготовок круглых профилей, получаемых в НГ 350. Такое техническое решение - плющение круглых прутков на гладких валках в условиях непрерывного стана - на заводах цветметобработки ранее не применялось. Прокатка заготовок широких шин осуществлена по схеме гладкая бочка-ребровой калибр-гладкая бочка. Эта схема, обладая определенной гибкостью, оказалась оптимальной, так как позволяет быстро переходить с профиля на профиль при использовании одного комплекта валков и простой арматуры.

2. Впервые в отечественной практике освоена горячая прокатка меднокадмиевых клиновидных полос высокоответственного электротехнического назначения. При прокатке промышленных партий заготовок восьми размеров из БрКд1 шириной 83...104 мм клин из прямоугольника формировали, с учетом положительного опыта освоения, в трех последних клетях НГ 350 вместо двух, как планировалось первоначальным вариантом технологии.

¹⁴ Факт значительного уменьшения адгезии при горячей прокатке медных сплавов к нержавеющей сталям по сравнению с традиционными материалами, идущими на изготовление пропусков, давно замечен прокатчиками, но, видимо, в литературе не описан и не объяснен.

Практическая прокатка подтвердила достоверность результатов эксперимента и теоретического анализа, в соответствии с которыми режимы обжатий в подготовительной и предчистовой клетях были умеренно форсированы.

Из горячекатаных заготовок путем двух-трехкратного волочения через составные волокна получены коллекторные полосы, большинство позиций которых по своим параметрам соответствуют профилям повышенной (класс 3а) и высокой (класс 3) точности согласно ГОСТу. Промышленные партии коллекторных полос успешно использованы заводами-потребителями по действующей технологии штамповки ламелей и сборки коллекторов тяговых двигателей магистральных электровозов и тепловозов.

3. В результате освоения прокатки полосовых профилей вместо ранее применявшегося прессования достигнуты высокие технико-экономические показатели: более чем в 6 раз повышена производительность при получении коллекторной заготовки; размеры сечения горячекатаной полосы приближены к размерам холоднотянутого коллекторного профиля, что позволило сократить маршруты волочения на 1-2 протяжки; выход годного по новой технологии увеличен на 10...12%; разгружено прессовое оборудование, снята часть заказов с морально и физически устаревшего линейного стана.

4. Налажено производство промышленных партий медной катанки диам. 8 мм, прокатываемой как из вайербарсов внешней поставки, так и из непрерывнолитых слитков собственного производства. Катанка удовлетворяет первому классу требований ТУ по всем параметрам, кроме размерной точности, которая соответствует третьему классу ТУ.

С целью повышения точности катанки по горизонтальному размеру целесообразен вариант интенсивной калибровки, включающей систему калибров с высокой вытяжной способностью и соответственно пониженным уширением. Это обеспечивает уменьшение числа работающих клетей и расширяет возможности для прокатки с петлей, но вместе с тем нарушает принцип универсальности калибровки.

5. С целью обеспечения стабильного процесса прокатки разнообразных профилей проведена модернизация большинства позиций проводковой арматуры обжимной клетки и непрерывных групп стана с документированием реализованных в ходе освоения решений и выпуском рабочих чертежей. При этом успешно использована не только собственная практика совершенствования арматуры ПНС 250, но и многолетний опыт реконструкции арматуры стана 250 Пермского завода «Камкабель».

5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

5.1. Зависимость структуры и свойств кадмиевой бронзы от режимов пластической и термической обработки

Кадмиевая бронза БрКд1 ($\text{Cu} + 0,9...1,2\% \text{ Cd}$), электрическая проводимость которой составляет 85% по отношению к технической меди, известна как материал, применяемый для изготовления деталей скользящего электрического контакта (ламель коллекторных электрических машин, проводов контактной сети, токосъемников и др.). С учетом условий эксплуатации таких деталей (абразивного износа, усугубленного явлением электроэрозии, а также разогрева места контакта) эта бронза должна обладать определенным уровнем механических свойств и эксплуатационных характеристик. Несмотря на широкие области применения кадмиевой бронзы, публикации по структуре и свойствам сплава БрКд1 в зависимости от параметров пластической деформации и термообработки малочисленны и разрознены, поэтому была сделана попытка дополнить их.

Образцы для исследования свойств БрКд1 были вырезаны из слитков сечением 100x100 мм, отлитых полунепрерывным способом. Исходная макроструктура поперечного сечения слитка представляла собой зону мелких зерен (вблизи его поверхностей) и зону крупнозернистых столбчатых кристаллов длиной 15...20 и шириной 1...2 мм твердого α -раствора (в остальной части сечения слитка). Образцы деформировали осадкой в направлении литейной оси слитка шлифованными бойками со смазкой (смесью солидола с графитом в отношении 1:1); при этом наблюдали увеличение твердости образцов с ростом степени деформации ϵ

Относительное

обжатие $\epsilon, \%$	0,0	5,4	10,7	15,2	26,6	51,4
------------------------	-----	-----	------	------	------	------

Твердость НВ,

МПа	625	625	691	826	1000	1090
-----	-----	-----	-----	-----	------	------

Исследование микроструктуры образцов после деформации показало, что в изученном диапазоне значений ϵ деформация не приводит к дроблению зерен, а развивается внутри них. При низких значениях ϵ , равных 5...10%, деформация распределяется по зернам неоднородно:

имеются зерна без следов скольжения и зерна, в которых наблюдаются единичные линии скольжения; при значениях $\epsilon > 20\%$ деформация охватывает весь объем образца и по телу зерен распределяется однородно.

Деформированные образцы нагревали до температур 400, 500, 600 и 750°C, время выдержки при каждой температуре 1 ч. Анализ результатов показал, что нагрев до 400°C не снимает упрочнения от предшествующей холодной деформации. Твердость слабдеформированных образцов после такого нагрева практически не изменилась; в образцах, продеформированных на 26 и 51 %, наблюдали сравнительно небольшое понижение твердости - на 140 и 170 МПа соответственно (рис. 5.1). При микроструктурном исследовании бронзы после нагрева до температуры 400°C обнаружено протекание начальных

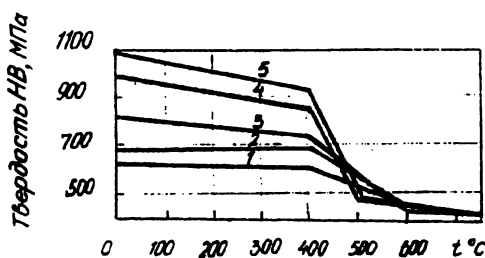


Рис.5.1. Твердость кадмевой бронзы в зависимости от температуры нагрева и степени деформации, %: 1 - 5,4; 2 - 10,7; 3 - 15,2; 4 - 26,6; 5 - 51,4

этапов рекристаллизации. Полное снятие наклепа в образцах, деформированных на 26 и 51 %, обнаружено после нагрева до 500°C, а в слабдеформированных образцах с $\epsilon = 5,4\%$ и $10,7\%$ - до 600°C.

Отжиг при 600°C приводит к получению рекристаллизованной структуры во всех образцах, причем в слабдеформированных образцах зерна крупнее, чем в сильнодеформированных, несмотря на развитие в последних собирательной рекристаллизации. Нагрев до 700°C приводит к развитию собирательной рекристаллизации во всех образцах, при этом твердость бронзы снижается с 625 до 400...415 МПа. Сравнивая значения твердости исходного (625 МПа) и полностью отожженного (400 МПа) металла, можно предположить, что упрочнение литого металла, порожденное воздействием напряжений, возникающих при кристаллизации слитка, при последующей термообработке эффективно снижается лишь при высоких температурах.

После отжига при 500°C в образцах, осаженных с различной степенью деформации, получились зерна, близкие по размеру (рис. 5.2). Это объясняется, по-видимому, тем, что в сильнодеформированных

образцах в этих условиях успевает частично произойти собирательная рекристаллизация, в то время как у слабдеформированных не полностью завершается даже первичная.

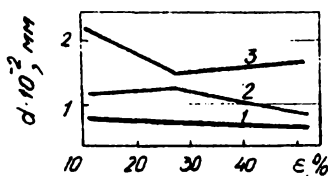


Рис.5.2. Средний размер рекристаллизованных зерен кадмиевой бронзы в зависимости от степени деформации и температуры нагрева, °C : 1 - 500; 2 - 600; 3 - 750

Сопротивление кадмиевой бронзы холодной деформации σ_s изучали при осадке предварительно отожженных цилиндрических образцов ($h_0=10\text{мм}$, $d_0=10\text{мм}$) со смазкой хозяйственным мылом на полированных бойках универсальной испытательной машины. Кривая деформационного упрочнения сплава БрКд1 представлена на рис. 5.3. Для удобства использования в инженерной практике эта кривая аппроксимирована формулой

$$\sigma_s = 90 \exp(2\sqrt{\epsilon}) \text{ МПа}, \quad (5.1)$$

где ϵ - относительное обжатие, выраженное в долях единицы.

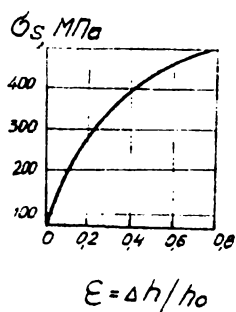


Рис.5.3. Кривая деформационного упрочнения кадмиевой бронзы

Сопротивление деформации в широком диапазоне температур нагрева Θ при однократном и ступенчатом нагружении определяли на пластометре конструкции УЗТМ¹⁵, опыты проводили при скоростях деформации U , равных 1; 10; и 50 с⁻¹. Смазка - порошкообразный серебристый графит. Образцы ($h_0=9$ мм, $d_0=6$ мм) вытачивали из прессованных прутков и из слитка, отлитого полунепрерывным способом; после изготовления их отжигали при температуре 750° С в течение 1 ч.

Истинные значения σ_s с учетом влияния внешнего трения на конечные результаты определяли на основании пересчета данных, характеризующих контактное давление p , по формуле А.Ф. Головина:

$$p/\sigma_s = 0,315 \mu (d/h) \sqrt{1 + (0,315 \mu d/h)^2}, \quad (5.2)$$

где d и h - текущие размеры цилиндрического образца;

μ - коэффициент внешнего трения, принятый равным 0,15.

Результаты получены при постоянной скорости деформации в течение всего времени осадки, но на кривых нет явно выраженных максимумов (рис. 5.4). Более того, при всех скоростях деформации, высоких температурах и $\epsilon = \ln h_0/h_1 > 0,6$ наблюдается заметное повышение значений σ_s . Аналогично поведение опытных кривых, полученных для некоторых медных сплавов [27].

Необычно влияние скорости деформации на σ_s в интервале $\Theta=200...500^\circ\text{C}$: увеличение U приводит к снижению σ_s . Очевидно, здесь преобладают разупрочняющие процессы, нарастающие по мере увеличения U вследствие теплового эффекта деформации и развития динамической полигонизации и рекристаллизации. Это подтверждается тем, что интенсивность снижения σ_s с ростом U падает с повышением температуры испытаний. Известно, что в опытах, приближенных к условиям адиабатического процесса (в экспериментах это по возможности соблюдалось) прирост температуры в результате пластического деформирования пропорционален контактному давлению и величине деформации.

При 500...600° С σ_s практически не зависит от U . При температурах 700...900° С наблюдается некоторое возрастание σ_s , увеличивающееся с повышением Θ и U . Однозначного объяснения процессам, порождающим аномальную скоростную зависимость исследуемого сплава в этом температурном интервале, пока нет. Подобный тип зависимости получен ранее авторами работы [29] для малоуглеродистых сталей 08кп и 08Ю.

¹⁵ Исследование проводили совместно с к.т.н. В.Б. Ляшковым и Г.Н.Сунцовым.

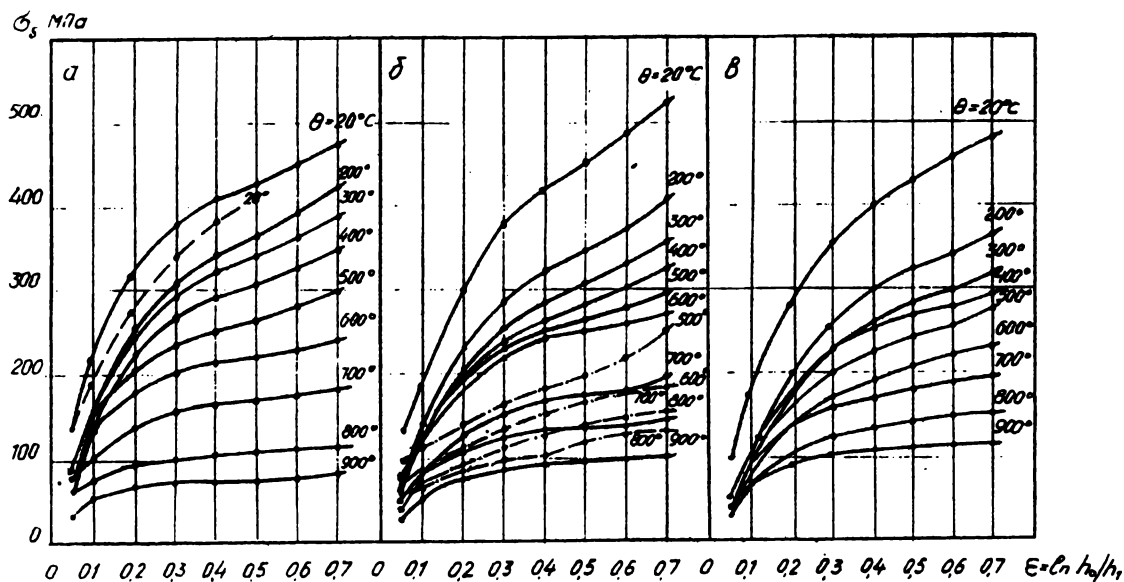


Рис. 5.4. Зависимость сопротивления деформации БрКд1 от степени, температуры и скорости деформации: а - $U = 1 \text{ c}^{-1}$, штриховой линией показана кривая, полученная при растяжении; б - $U = 10 \text{ c}^{-1}$, штрих-пунктирными линиями проведены кривые, полученные при испытании литого металла; в - $U = 50 \text{ c}^{-1}$

Установлено, что σ_s кадмиевой бронзы в литом состоянии значительно ниже, чем в предварительно деформированном. Это обусловлено различным структурным состоянием сплава.

Экспериментальные данные исследования сопротивления деформации бронзы БрКд1 при однократном и ступенчатом нагружении аппроксимированы следующими формулами, учитывающими особенности поведения сплава:

$$\sigma_s = \sigma_0 e^{(1/a-1)\Sigma^2}, \quad (5.3)$$

где

$$\sigma_0 = \sigma_0^T + a(\sigma_0^* - \sigma_0^T)(1 - e^{-(U/U_0)^b}), \quad U_0 = 1 \text{ c}^{-1},$$

$$\sigma_0^T = \begin{cases} \sigma_0^*(1 - \Theta/\Theta_s) & \text{при } \Theta < 550^\circ\text{C} \\ \sigma_0^*(\Theta_s/\Theta - 1)/2 & \text{при } \Theta > 550^\circ\text{C}, \end{cases}$$

$$\Sigma_s = 1 - e^{-\epsilon}, \quad \Sigma = \epsilon e^{-(k_1)^b}, \quad t = \epsilon/U,$$

$$K = \frac{\sigma_0}{E\epsilon} \left(\frac{\Theta}{\Theta_s} \frac{U}{\epsilon} \right)^a,$$

причем $\sigma_0^* = 100$ МПа; $a = b = 1/3$; $\Theta_s = 1100^\circ\text{C}$;

E - модуль упругости, определяемый по формуле, полученной для технически чистой меди МПа:

$$E = 10^4(13,5 - 8\Theta/\Theta_s).$$

Для литого сплава в правую часть формулы (5.3) следует вводить в качестве сомножителя коэффициент k_1 , с помощью которого учитывается уплотнение сплава с ростом ϵ :

$$k_1 = 1 - a e^{-\epsilon}$$

При ступенчатом нагружении (рис. 5.5) величина σ_s в паузе может быть определена с использованием вышеприведенных формул, в которых под t понимается время паузы, а коэффициент разупрочнения k принимается таким же, каким он был в конце предыдущего нагружения, т.е. в начале паузы.

Чтобы оценить, как влияют на пластичность сплава при прокатке температура нагрева, напряженное состояние и состояние поверхности (литая либо механически обработанная), проведены опыты по прокатке на клин призматических образцов квадратного и крестообразного поперечного сечения¹⁶. У образцов для испытаний, полученных из слитка полунепрерывной разливки сечением 104x104 мм, часть свободной поверхности была обработана строжкой, остальная поверхность оставалась литой. Оценка пластичности проводилась при следующих базовых температурах нагрева под прокатку: 850, 750, 500 и 300°C.

¹⁶ Исследование проводили совместно с д.т.н. Б.А. Мигачевым

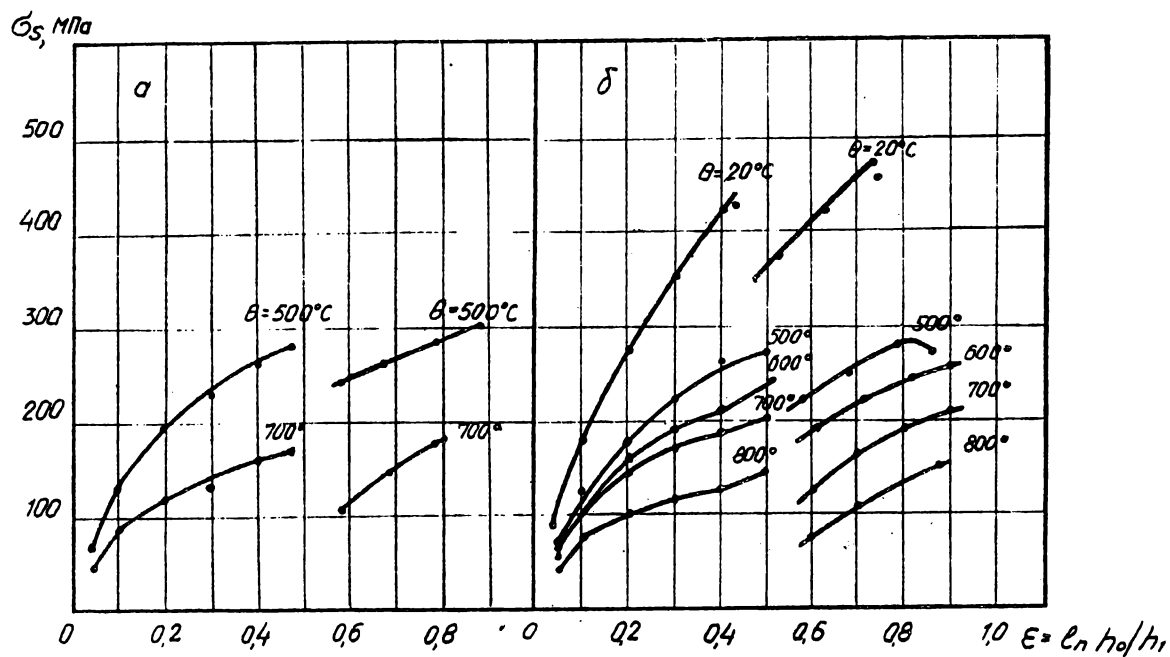


Рис. 5.5. Зависимость сопротивления деформации при ступенчатом нагружении: а - $U=10 \text{ cm/s}$, длительность паузы $t = 10 \text{ s}$; б - $U=10 \text{ cm/s}$, $t = 1 \text{ s}$

План двухфакторного эксперимента был разработан так, чтобы можно было количественно оценить влияние изучаемых факторов. Процедура обработки опытных данных существенно упрощалась за счет использования вспомогательных графиков - диаграмм оценки критерия пластичности A_p и показателя напряженного состояния σ/T в зависимости от h_0/h_1 , где h_1 - высота образца, при которой появляются трещины на свободной (боковой) поверхности прокатанного образца. Факторный эксперимент позволил получить результаты в виде уравнений регрессии и на их основании сделать следующие выводы:

- в интервале исследованных температур пластичность поверхностных слоев литого металла является низкой; механическая обработка повышает уровень пластичности в 1,5...2,5 раза (в зависимости от температуры испытания и напряженного состояния);

- повышенную пластичность сплав имеет при температурах деформации ниже 500°C; при бездефектной исходной поверхности он может вполне удовлетворительно деформироваться и в области высоких температур (800...900°C);

- влияние напряженного состояния на пластичность является значимым и примерно в 2...2,5 раза превышает влияние температуры.

Судя по поведению сплава при его деформационной и термической обработке в интервале 400...600°C (по уровню возникающих в нем напряжений и характеру получаемых структур), можно рекомендовать его теплую прокатку, сулящую значительную экономию топлива при незначительном повышении расхода электроэнергии на прокатку. Кроме того, в описанных далее в подразделе 5.2 опытах по горячей и теплой прокатке слитков БрКд1 с поперечным сечением 30x30 и 50x50 мм сплав в отличие от крайне низкой деформируемости при прокатке промышленных слитков сечением 100x100 мм показал вполне удовлетворительную пластичность. Этот результат в сочетании с вышеприведенными выводами об уровне пластичности сплава в различных условиях опытной прокатки позволяет сделать заключение о возможности и целесообразности процесса получения изделий из кадмиевой бронзы на непрерывном литейно-прокатном агрегате при формировании литой заготовки с поперечным сечением до 50x50 мм.

Представленная информация существенно дополняет известные данные по свойствам кадмиевой бронзы и позволяет более обоснованно прогнозировать результаты режимов ее деформационной и термической обработки.

5.2. Деформируемость слитков кадмиевой бронзы в зависимости от технологических факторов литья и прокатки¹⁷

Кадмиевая бронза БрКд1 относится к низколегированным безоловянистым бронзам. Горячая прокатка слитков этого сплава не проводится из-за крайне низкой его пластичности в литом состоянии. Это приводит к усложнению технологического процесса, так как перед прокаткой предусматривается операция горячего прессования.

До настоящего времени заготовительное прессование считается неизбежным, хотя в работе П.И. Градусова [30], относящейся к началу 1930-х годов, сообщалось об успешных промышленных экспериментах по горячей прокатке круглых слитков диам. 115 мм с содержанием кадмия 0,59...2,52%. П.И. Градусов получал слитки наполнительным литьем в песчаную форму или чугунную изложницу (в тексте публикации тип изложницы не указан). По результатам проделанных опытов сделаны выводы: предел прокатываемости вгорячую сплава медь-кадмий ограничен содержанием 1,2% кадмия; рекомендуемая температура нагрева перед прокаткой 780...800°C.

В конце 40-х – начале 50-х годов на заводах ОЦМ началось широкое внедрение полунепрерывного способа литья многих металлов и сплавов (в том числе и сплава БрКд1) взамен наполнительного с целью улучшения качества слитков и повышения технико-экономических показателей процесса литья. Ожидалось, что внедрение этого способа литья повысит деформируемость слитков при горячей прокатке. Однако опыты по прокатке слитков БрКд1 полунепрерывного литья, проведенные сотрудниками института Гипроцветметобработка (Р.А. Бахтиаровым и др.) совместно с работниками Каменск-Уральского завода ОЦМ, не дали положительного результата: заготовки растрескивались в первых же проходах [31]. Авторы объяснили разрушение отсутствием прочных связей между дендритами вследствие их незначительной разветвленности и наличием межкристаллических несплошностей усадочного происхождения. Опираясь на такое объяснение, они пытались повысить пластичность за счет оптимизации режимов литья, однако положительных результатов получить не удалось.

Дальнейшее исследование причин растрескивания слитков полунепрерывного литья при горячей прокатке было проделано немецкими специалистами В. Брандштеттером и Г. Рудольфом [32]. Для выявления причин образования трещин были исследованы микроструктура и химическая неоднородность металла в

¹⁷ Работу проводили совместно с д.т.н. Р.К. Мысик

приповерхностной корочке слитка толщиной 0,1...0,2 мм на установке «Камека» и электронном микроскопе при 1000-кратном увеличении. Было установлено, что по границам зерен имеются выделения, представляющие собой эвтектику с высоким содержанием кадмия и температурой плавления 544°C. Поскольку горячая прокатка слитков производится при 800...850°C, образование трещин авторы [32] объяснили тем, что границы зерен в зоне литейной корочки оплавляются. Чтобы избежать образования эвтектики, предложено либо увеличить скорость охлаждения при литье, подавив тем самым ликвацию кадмия, либо выдерживать слитки при нагреве под прокатку при 800...850 °C минимум 45 мин, совместив тем самым процесс нагрева с гомогенизирующим отжигом. Однако в статье [32] не приведены результаты экспериментальной проверки предложенных рекомендаций.

В монографии [33] представлены данные о пластических свойствах (относительном удлинении и сужении) литого сплава БрКд1 в интервале температур 20...800°C; они качественно подтверждают выводы работы [32]: при температуре выше 500°C пластичность сплава резко снижается.

Уже первые эксперименты, выполненные авторами по деформируемости литого сплава, показали, что этот сплав следует отнести к группе материалов, особо склонных к разрушению в начальной стадии прокатки. Основанием для такого заключения послужили случаи раскрытия переднего конца полосы с образованием так называемой «крокодиловой пасти» при горячей прокатке с характерными для первых проходов в обжимной клетке пониженными значениями фактора формы очага деформации l/h_{cp} , где l - длина очага деформации, $l = \sqrt{R(h_0 - h_1)}$; h_{cp} - средняя высота очага деформации, $h_{cp} = (h_0 + h_1)/2$.

Образование «крокодиловой пасти» известно для алюминиевых, титановых, а также некоторых других сплавов и служит весомым признаком низкой деформируемости материала.

Структура литого металла оказывает определяющее влияние на деформируемость слитков. В связи с этим было изучено влияние инокуляторов¹⁸ на структуру и деформируемость слитков из сплава БрКд1. Исследование особенностей процесса затвердевания слитков с введением в расплав инокуляторов в количестве 1; 2 и 3% проводилось при заливке сплава в медную или стальную изложницы с внутренними размерами 30x30x150 мм. В качестве инокуляторов применяли медную обсежку различного фракционного состава (200, 630 и 1000 мкм).

¹⁸ Инокуляторы (иначе - микрохолодильники) - частицы вещества в виде гранул, стружки и др., вводимые в жидкий металл для ускорения его охлаждения во всем объеме. Способ заливки с введением инокуляторов называется суспензионным.

Из уравнения теплового баланса [34] для кадмиевой бронзы имеем

$$T_m = \frac{100T_{\text{за}} - 103n}{100 + n},$$

где T_m - температура расплава после ввода иноксидаторов, °C;

$T_{\text{за}}$ - температура заливки металла в изложницу, °C;

n - количество введенных иноксидаторов, %.

При температуре заливки 1180 °C и введении иноксидаторов в количестве 1; 2 и 3 % температура расплава снижается соответственно до 1167, 1154, 1142 °C. Установлено, что ввод 1 % иноксидаторов снижает температуру расплава в среднем на 10...15 °C. Анализ термограмм показал, что время затвердевания слитков было наименьшим в случае применения иноксидаторов с размером частиц 200 мкм.

Микроструктура контрольного слитка характеризуется наличием трех структурных зон: мелких кристаллов, столбчатых кристаллов и центральной зоны равноосных кристаллов. В опытных слитках зона столбчатых кристаллов присутствует только тогда, когда в расплав введен 1 % иноксидаторов, и исчезает при 2 и 3 % иноксидаторов. Исследование микроструктуры опытных и контрольных слитков свидетельствует о том, что во всех случаях сплав имеет дендритный характер кристаллизации.

На основе статистической обработки макро- и микрокартин определены параметры структуры слитков (табл. 5.1).

Анализ показывает, что при суспензионном способе заливки удается значительно измельчить структуру меднокадмиевого сплава. При введении иноксидаторов величина зерна оказалась сопоставимой с величиной зерна прессованной заготовки.

Таблица 5.1

Параметры структуры слитков

Количество инокуля- торов, %	Размер частиц, мкм	Размер зерна, мм		Размер дендритной ячейки, мкм	
		медная изложница	стальная изложница	медная изложница	стальная изложница
1	200	0.65	0.86	1.40	1.47
2		0.62	0.83	1.40	1.46
3		0.60	0.70	1.31	1.38
1	630	0.70	0.85	1.43	1.50
2		0.64	0.75	1.42	1.49
3		0.62	0.75	1.37	1.42
1	1000	0.68	0.88	1.41	1.49
2		0.65	0.85	1.39	1.43
3		0.61	0.79	1.34	1.40
Контрольный слиток		0.77	0.93	1.49	1.56

Таким образом, выбирая рациональный размер и количество дисперсных инокуляторов, можно снизить негативное влияние масштабного фактора (размера слитка), материала и толщины стенки изложницы на структуру металла.

Были проведены сравнительные исследования свойств металла слитков, полученных обычным способом и с введением инокуляторов. Исследования проводились на поперечных и продольных темплатах. Поскольку размер слитков недостаточен для получения стандартных образцов для измерения механических свойств, использовали метод определения предела прочности и предела текучести, предложенный в работе [35]. С помощью замеров микротвердости оценивалась дендритная ликвация сплава. Во всех случаях значения микротвердости в объеме зерна и на его границе различаются, что говорит о наличии ликвации в пределах зерна. Эксперименты свидетельствуют, что чем больше введено инокуляторов, тем меньше степень дендритной ликвации. Снижение перегрева сплава и увеличение скорости охлаждения создают предпосылки для формирования в слитках мелкокристаллической структуры; в результате уменьшаются размеры междендритных промежутков и микроучастков, обогащенных ликватом, и происходит более равномерное распределение ликвирующих компонентов по сечению слитка. Введение инокуляторов несколько снижает среднее значение микротвердости (рис. 5.6).

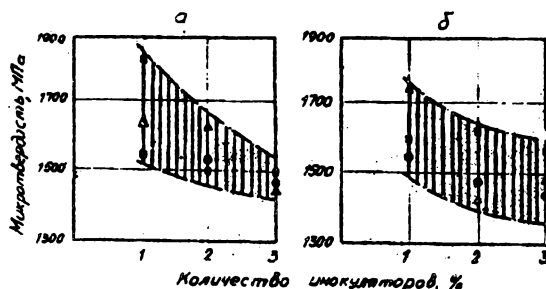


Рис.5.6. Микротвердость контрольных слитков: а - медная изложница; б- стальная изложница; ● - фракция инокуляторов 0,2 мм; Δ - 0,63; ■ - 1,0

Анализ механических свойств опытных и контрольных слитков показал, что прочностные и пластические свойства повышаются на 20...30% в зависимости от количества введенных микрохолодильников. Полученные данные позволяют сделать предположение об улучшении деформируемости меднокадмиевого сплава, отлитого с введением инокуляторов.

Результаты опытов нашли свое подтверждение при изучении возможности прокатки литой кадмиевой бронзы в виде слитков с размерами поперечного сечения 30х30 мм в лабораторных условиях, 50х50 и 100х100 мм в промышленных условиях. При этом деформируемость слитков оказалась в прямой зависимости от количества введенных инокуляторов в расплав и в обратной - от размера поперечного сечения слитка. Слитки размером 30х30 мм прокатывались без трещин даже при больших разовых обжатиях; слитки сечением 50х50 мм также показали высокую деформируемость. Это означает, что, как указывалось в подразделе 3.1, применительно к кадмиевой бронзе может быть перспективным использование совмещенных процессов литья и прокатки на современных литейно-прокатных агрегатах.

Хотя слитки 100х100 мм разрушались при прокатке, образцы в виде брусков с поперечным сечением 30х30 мм, вырезанные из этих слитков, показали высокую деформируемость при горячей прокатке в случае их омеднения, стеклоэмалирования и при использовании других покрытий-пластификаторов. Установлено, что деформируемость кадмиевой бронзы ощутимо повышается с понижением температуры прокатки, в том числе и для промышленных слитков 100х100 мм.

Дополнительно к приведенным представляются перспективными следующие технические решения:

- создание в процессе литья утолщенного периферийного слоя слитка с мелкозернистой структурой и остаточными напряжениями сжатия;
- создание периферийного слоя, обедненного по содержанию кадмием (слиток кадмиевой бронзы в медной оболочке);
- предварительная деформация слитка в холодную на уровне 5...10% ковкой с большими подачами, обеспечивающая предпрокатное улучшение структуры слитка.

5.3. Повышение качества прессованной заготовки из кадмиевой бронзы для горячей прокатки

Коллекторные полосы из кадмиевой бронзы получают волочением клиновидных заготовок, прокатанных из прессованных квадратных заготовок сечением 95х95 мм (по заводской терминологии - «квадратов»). Операция прессования предусмотрена из-за чрезвычайно низкой пластичности сплава БрКд1 в литом состоянии, не допускающей его горячую прокатку вследствие грубого растрескивания в первых же проходах. С целью повышения качества поверхности пресс-изделий прессование ведется с рубашкой.

Необходимость в повышении качества прессованной заготовки возникла в связи с тем, что при изготовлении коллекторов электрических машин на предприятии-потребителе имелись случаи вскрывшихся на пластинах продольных внутренних расслоений.

Слитки для прессования диам. 290 мм получают наполнительным литьем в водоохлаждаемую изложницу, режут их на заготовки длиной 420 мм и прессуют на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 35 МН из контейнера диам. 300 мм с пресс-остатком 35 ± 5 мм. Для исключения проникновения пресс-утяжины в готовое изделие у прессованных заготовок отрезают задние концы длиной 110...130 мм. При раскросе слитков одновременно удаляют литник длиной 60...100 мм.

При прямом прессовании в конце истечения в изделиях образуются пресс-утяжины - центральная и периферийная. Условия их образования и размеры зависят от величины пресс-остатка, температуры и чистоты поверхности втулки контейнера и пресс-шайбы, пористости, степени прогрева и состояния поверхности слитка (толщины окалины в функции времени нагрева, присутствия остатков смазки после литья).

Для изучения протяженности центральной пресс-утяжины, которую во избежание влияния случайных факторов определяли в течение двух кампаний, использовали промышленные заготовки с маркировкой места их расположения - из донной или литниковой части слитка.

«Донные» заготовки, поступающие на прессование с необрезанной донной частью, вводили в контейнер с примыканием этой части к пресс-шайбе, чтобы все имеющиеся в ней дефекты задержались в пресс-остатке. Кроме того, более плотная донная часть слитка улучшает условия истечения металла и тем самым уменьшает протяженность пресс-утяжины. «Литниковые» заготовки обрезают с обоих торцов, поэтому в действующем производстве их закладывают в контейнер произвольно. В опытах эти заготовки помещали в контейнер по двум вариантам: половину - литником к пресс-шайбе, другую - литником к матрице.

Длину центральной пресс-утяжины в «квадратах», полученных из донной и литниковой частей слитка, проверяли отдельно, а определяли ее ультразвуковым контролем (УЗК) с помощью дефектоскопа УДМ-1М, затем - контролем места окончания пресс-утяжины по изучению макрошлифов темплетов. Температуру нагрева заготовок на выходе из нагревательной печи измеряли оптическим пирометром типа ОПИР-09 и поддерживали в интервале 840...900°C. При подаче в контейнер их температура снижалась примерно на 10...20°C. Величина пресс-остатка

45±5 мм. Качество пресс-рубашки оценивали визуально. Прессование вели с использованием рабочих пресс-шайб с диаметром, меньшим диаметра втулки на –6 мм, для получения рубашки толщиной –3 мм.

Анализ показал, что на «квадратах», вне зависимости от варианта прессования, имеется значительная пресс-утяжина: по данным 1-й кампании - длиной 160...400 мм (в двух случаях - 540 и 600 мм); по данным 2-й кампании - длиной 130...430 мм на 7 из 10 «квадратов» («донные» заготовки). На «квадратах» 2-й кампании («литниковые» заготовки) пресс-утяжина длиной 200 мм оказалась на двух «квадратах» из 10. Следовательно, увеличение пресс-остатка до 45±5 мм нецелесообразно.

Массовая проверка на заготовках серийного производства показала, что наибольшие протяженность (до 500...600 мм) и частота появления пресс-утяжины наблюдаются при использовании заготовок с необрезанной донной частью. При получении «квадратов» из заготовок с обрезанными концами протяженность пресс-утяжины не превышает 230 мм, частота ее появления также сокращается. Это порождает рекомендации: необходимо вести постоянный УЗК центральной пресс-утяжины и обрезать донную часть слитка до полного удаления дефектов.

На поверхности прессованных «квадратов» 95х95 мм часто наблюдаются видимые визуально дефекты в виде пузырей, которые появляются сразу после прессования на задней половине изделия. Количество пузырей на изделии нестабильно. Появление пузырей происходит предпочтительно в конце прессования и является следствием образования периферийной пресс-утяжины. Возникновению последней способствуют налипшая на поверхность втулки отвалившаяся окалина и остатки пресс-рубашки на стенках втулки, загрязненная окислами или продуктами сгоревшей смазки поверхность слитка.

Известно, что в меди запрессованные окислы всегда размещаются вблизи поверхности, и вероятность их запрессовки уменьшается с улучшением поверхностей слитка и контейнера. При прессовании меди тщательно следят за состоянием контейнера, периодически прочищая его контрольной пресс-шайбой, так как налипший слой окислы может увлекаться следующим слитком и запрессовываться в изделие. Сплав меди с кадмием по своим физико-химическим свойствам при температуре прессования близок к меди, и указанные рекомендации можно отнести и к этому сплаву.

Для полного удаления остатков пресс-рубашки и окалины провели прессование с контрольной пресс-шайбой диаметром, меньшим диаметра втулки на 0,5 мм. Было замечено, что появление первого «квадрата» с пузырями происходит после 10...15, а иногда и после значительно большего количества прессовок.

При прессовании иногда наблюдается скол застойной зоны, и, как правило, в этих случаях на «квадратах» появляются пузыри. Известно, что у металлов, которые сильно окисляются при нагреве или плохо свариваются при прессовании (медь; сплавы МНЖМц 30-0, 8-1 и БрОФ 0,5-0,4; сталь), зона застойного объема скалывается чаще. Видимо, и сплав медь-кадмий можно отнести к этой группе. Появлению скола способствует прорыв с поверхности заготовки окалины и загрязнений в области интенсивного течения металла в конце прессования, особенно при плохом качестве поверхности слитка.

Поскольку в прессовый цех иногда поступают слитки с грубыми поверхностными дефектами - неслитинами, раковинами, засорами, с выпуклыми торцами от размытого поддона, были пропрессованы такие слитки. Наблюдения при массовом прессовании показали, что полный скол застойной зоны приводит к появлению пузырей. Для их удаления необходимо использовать при прессовании слитки с чистой поверхностью, а также проводить профилактическую очистку внутренней поверхности втулки от окалины. Очистку можно проводить водой или 2...3-кратной прочистной контрольной пресс-шайбой. В результате проведенных мероприятий улучшилось качество продукции, выход годного повысился на 2,16%.

5.4. Уменьшение окисления медных полуфабрикатов при нагреве и прокатке¹⁹

В процессе нагрева до 850...900°C и последующей горячей прокатки медных слитков значительное количество дефицитного металла теряется с окалиной: потери металла из-за окалинообразования достигают 0,4...0,7%. Кроме того, резко снижается качество готовых холоднотянутых изделий в связи с появлением на их поверхности дефекта «вкатанная окалина», толщина которого может достигать 1 мм. Появление этого внешнего дефекта обусловлено несколькими причинами.

1. В процессе прокатки окалина отслаивается с поверхности раската, накапливается в проводках и передающих желобах стана и затем вовлекается движущейся полосой в межвалковый зазор, после чего на поверхности металла остаются отпечатки от скоплений окалины, свободные или заполненные ею.

¹⁹ Работу проводили совместно с д.т.н. И.А. Дмитриевым и Т.В.Матвеевой

2. Налипшая на поверхность валков окалина (чаще - многослойная) спорадически от нее отрывается и вкатывается в металл. При травлении окалина удаляется с преобладающей части поверхности полосы, но, как правило, сохраняется в случае ее глубокого вкатывания на отдельных участках проката, а иногда - вследствие затрудненного доступа кислоты к поверхности полос, собранных в пакеты.

3. Во впадины, появившиеся в результате удаления в травильной ванне многослойной окалины, может попадать шлак, который при волочении, подобно неудаленной окалине, препятствует разглаживанию поверхностных дефектов.

Наиболее широкое распространение среди способов уменьшения окисления медных слитков при нагреве под прокатку получило создание нейтральной или восстановительной атмосферы [36], однако этот способ недостаточно эффективен, так как уменьшение количества окалины незначительно и составляет 10...20%. Дополнительными трудностями при этом являются при создании нейтральной атмосферы - подсос воздуха в рабочее пространство печи, при нагреве в восстановительной атмосфере - резкое ухудшение пластических свойств металла вследствие его наводороживания. В последнее время с целью защиты металла от окисления появились рекомендации по применению органических и специальных эмульсий, растворов солей, керамических, стеклокерамических и стеклометаллических покрытий [37, 38].

Лабораторное исследование, направленное на поиск эффективной защиты медных вайербарсов от окисления в процессе нагрева и последующей прокатки (а.с. 1736106 СССР), привело к предложению реакционно-термического стеклозащитного покрытия, легированного оксидами поливалентных металлов и наносимого путем окунания медного слитка в шликер и высушивания последнего. В табл. 5.2 представлены составы предложенного защитного покрытия.

Таблица 5.2

Натриевобратные покрытия для защиты меди от окисления в процессе нагрева

Компонент	Состав стеклопокрытия, %		
	1	2	3
H_3BO_3	42	36	30
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	32	38	44
WO_3	0,5	0,7	1,5
MoO_3	0,5	0,8	1,5
H_2O	25	24,5	23

Установлено, что композиция, состоящая из натриевооборотного стекла с незначительными добавками оксидов молибдена и вольфрама, надежно блокирует поверхность меди от доступа кислорода при нагреве, замедляя процесс ее окисления и стабилизируя систему металл-атмосфера печи. Дополнительное преимущество композиции состоит в том, что она не требует больших затрат, проста и надежна в употреблении. Это обусловлено тем, что синтез покрытия проводится не традиционным путем варки стекла, связанным с применением дополнительных энергозатрат и дорогостоящего оборудования, а осуществляется по методу «растворной керамики», который включает приготовление шликера. Оплавление покрытия совмещено с процессом нагрева слитков, чем обеспечивается надежная защита металла в температурном интервале 300...900°C.

Получение весьма эффективного покрытия связано с образованием на поверхности меди кристаллического слоя, препятствующего проникновению кислорода к поверхности металла. Это подтверждают данные рентгено-фазового анализа, согласно которым при оплавлении защитного покрытия на меди образуется трехслойный комплекс:

- основной металл (медь);
- переходный слой, состоящий из кристаллических натриймедьсодержащих боратов;
- верхний стеклообразный рентгеноаморфный слой.

Растворенный в верхнем слое кислород не проникает к поверхности меди из-за образования переходного кристаллического слоя, который приводит в устойчивое состояние всю систему металл - покрытие атмосфера печи. Необходимое условие для создания защитного боратного покрытия – обеспечение достаточно полной кристаллизации боратной составляющей, непосредственно прилегающей к меди. Важным фактором является образование кристаллов метабората меди $\text{CuO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$. Однако метаборат меди обладает сложной анионной структурой и трудно кристаллизуется. Для стимулирования кристаллизационного процесса были предложены и опробованы катализаторы (оксиды молибдена и вольфрама), применение которых основано на принципе кристаллографического соответствия (табл. 5.3). Так, например, был подобран катализатор кристаллизации WO_3 , у которого линейный параметр a (0,54 нм) кристаллической решетки приблизительно равен параметру c (0,56 нм) решетки метабората меди, а параметр c (1,13 нм) решетки катализатора весьма близок к параметру a (1,15 нм) метабората меди.

Таблица 5.3

**Параметры кристаллических решеток катализаторов
и выделяющихся фаз**

Кристаллизатор, выделяющаяся фаза	Параметры кристаллической решетки, нм	
	a	c
WO ₃	0,54	1,13
MoO ₃	0,54	1,153
CuO·B ₂ O ₃	1,148	0,562
Na ₂ O·B ₂ O ₃	1,193	0,646

При разработке натриевооборотного защитного покрытия учитывали основные требования, предъявляемые к стеклопокрытиям [39], которые обеспечивают минимальное окисление меди при нагреве, хорошее смачивание ее поверхности, химическую нейтральность к футеровке печи, соответствие термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) металла и покрытия, легкость удаления травлением защитной пленки после деформации металла. Результаты сравнения эффективности предложенных покрытий, полученные в лабораторных условиях, приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

**Параметры эффективности натриевооборотного
покрытия для защиты меди от окисления**

Параметр эффективности	Медная пластина без покрытия	Медная пластина с покрытием следующих составов		
		1	2	3
Потери меди в окалину, %	100	42	46	44
Угол смачивания, град:				
при 670°C		7	8	9
при 700°C		5	6	6
Продолжительность травления в 10%-ной H ₂ SO ₄ , мин	20	9	10	10
Термический коэффициент линейного расширения ТКЛР10, град	165	157	160	162

Анализ данных свидетельствует о целесообразности использования натриевооборотных покрытий для защиты меди от окисления при нагреве, так как они обладают определенными достоинствами: уменьшают потери металла в окалину в среднем на 54% по сравнению с незащищенной медью; сокращают

продолжительность травления в 2 раза; обладают хорошей смачивающей способностью, о чем свидетельствуют невысокие значения угла смачивания; обеспечивают высокую сплошность покрытия благодаря соответствию ТКЛР меди и покрытия. Промышленное применение разработанных натриевсборных покрытий в технологии нагрева и горячей прокатки медных полуфабрикатов может обеспечить существенное повышение технико-экономических показателей их производства.

5.5. Профилактика дефектообразования при горячей прокатке профилей из медных сплавов

К качеству готовых полос и профилей электротехнического назначения, особенно к состоянию их поверхности, предъявляются повышенные требования. Так, в соответствии с действующими техническими условиями поверхность коллекторных полос должна быть чистой, свободной от трещин, закатов и посторонних включений; глубина дефектов не должна превышать 0,020...0,025 мм (по 3-му классу точности).

Практически тем же требованиям должна удовлетворять и поверхность медных шин. В связи с этим в ходе освоения ПНС 250 было уделено значительное внимание мерам по профилактике дефектообразования, направленным на обеспечение необходимого качества продукции, сравнимого с качеством изделий, получаемых из прессованной заготовки, при сохранении высокой производительности и экономичности процесса прокатки.

Основной причиной образования грубых дефектов в виде углублений различной формы и размеров, сплошной рябизны и локальных точечных или удлинённых раковин на поверхности заготовок является вкатывание в металл довольно хрупкой печной окалины, толщина которой при особо неблагоприятных условиях может достигать 1 мм.

Кроме печной окалины некоторое негативное воздействие на качество продукции должна оказывать вторичная окалина. Но толщина такой окалины сравнительно невелика, и ее наличие большой роли обычно не играет.

Толщина слоя печной окалины зависит от температуры и продолжительности нагрева металла, типа печи, вида используемого топлива и характера атмосферы, в которой осуществляется нагрев. Так, при опытном нагреве сплава БрЖд1 в электрической камерной печи в воздушной среде при температуре 820...850°C в течение 1,5...2 ч толщина слоя окалины составляет 0,02...0,03 мм, а при продолжительности нагрева 8...10 ч - 0,06...0,10 мм. При длительном нагреве металла в методических печах, отапливаемых природным газом, при температуре 850...860°C толщина слоя может достичь 0,2 мм. Опыты также показали, что при неизменной продолжительности нагрева снижение температуры печи

на 80...100°C приводят к уменьшению толщины слоя печной окалины в 1,5...2 раза. Экспериментально установлено, что как по условиям формоизменения металла, так и по энергосиловым и прочностным характеристикам стана проведенное снижение температуры прокатки целесообразно и с точки зрения повышения качества продукции.

Для предохранения слитков и заготовок от чрезмерного окалинообразования во время нагрева в методических печах и при последующей прокатке можно считать перспективным направлением предварительное нанесение технологических защитных покрытий. Опыты, проведенные в лабораторных и производственных условиях, показали достаточно высокую эффективность специального реакционно-термического покрытия, в состав которого входят недефицитные борные соединения и присадки оксидов металлов (см. подраздел 5.4). Получение такого покрытия из предварительно смешанных компонентов, наносимого на заготовки в виде шликера, связано с протеканием в процессе нагрева металла высокотемпературных химических реакций. Предложенное покрытие позволяет существенно снизить интенсивность окисления и получить слой хрупкой окалины уменьшенной толщины, легко отделяемой от основного металла. Установлено, что на продолжительность и качество травления полос продукты покрытия, оставшиеся на них после прокатки, практически не влияют.

На время остановки стана по каким-либо причинам, в том числе организационного характера, нагревательная печь также отключается, но остается заполненной заготовками на всю длину ее пода, так как перемещение металла по глissажным трубам осуществляется с помощью толкателей. Сопоставление качества поверхности готовой продукции, полученной из заготовок, прокатанных при продолжительности нагрева в соответствии с технологией, и из заготовок, оставшихся в печи между рабочими сменами, показало более высокий уровень первых. В связи с этим для исключения длительного нахождения в печи заготовок, оставшихся не прокатанными до остановки стана, их следует выталкивать из печи, например, медными вайербарсами, многократно используемыми для этой цели, и, таким образом, всегда прокатывать только заготовки, нагретые за установленное время при пониженной температуре, составляющей, например, для сплава БрКд1 750...780°C вместо 850±20°C.

Если же заготовки из кадмиевой бронзы сечением 95x95 мм пребывают в печи по какой-либо причине сверхнормативное время, то, с целью удаления с них ранее образовавшейся окалины, перед повторным нагревом под прокатку предложено пропускать их через роликоправильную машину, установленную после горизонтального гидравлического пресса усилием 50 МН.

Для более интенсивного разрушения слоя окалины и более полного ее удаления с поверхности металла на дне ручьев второго ящичного калибра ОК 500 выполнено продольное рифление. Как показали опыты, использование рифления с выступами и углублениями высотой 3 мм позволяет примерно на 50...60% уменьшить количество окалины на заготовках, поступающих из обжимной клетки в непрерывную группу клеток стана. С той же целью было рекомендовано повысить давление воды на установке гидросбива окалины обжимной клетки до 4 МПа, а также изменить конструкцию и схему расположения рабочих органов этого устройства - вместо трех сопел со щелевыми наконечниками, расположенными на выходе из первого калибра под углом 120° друг к другу, установить по два сопла с наконечниками круглого сечения на выходе из первого и третьего калибров. Для улучшения условий смыва окалины на стане примерно на 30% увеличен объем охлаждающей воды, подаваемой на прокатные валки и арматуру. Дополнительные меры по повышению эффективности гидросбива и удаления со стана окалины были описаны в конце подраздела 1.2.

В процессе эксплуатации прокатных валков, используемых для горячей прокатки медных сплавов, на них возникает сетка разгара, в которую может вдавливаясь металл, образуя налипы, оставляющие, как окалина, углубления на поверхности раската. Поскольку такое налипание может наблюдаться на любой стадии работы валков, то за счет лишь регламентации сроков их перевалки избежать образования указанных поверхностных дефектов на прокате нельзя. Учитывая это, предложено использовать специальные скребки, контактирующие с валками и срезающие налипший на них металл.

Поверхностные дефекты на подкате могут возникать не только вследствие вкатывания печной окалины в металл, но и из-за царапин, наносимых на полосы проводками, передающими желобами, вкатывания образующейся при этом стружки и крошки от футеровки нагревательной печи; их источником могут быть подкорковые пузыри, сохранившиеся на прессованных заготовках из-за неполного удаления пресс-рубашки. Однако такие дефекты встречаются сравнительно редко, они имеют локальный характер, и для их предотвращения могут быть использованы довольно простые средства. Например, для борьбы со стружкообразованием необходимо исключить наличие острых кромок в привалковой арматуре, а для самопроизвольного удаления появившейся стружки, как показывает практика, следует выполнить в дне желоба специальные расположенные в шахматном порядке отверстия, которые полезны также и для удаления из межклетевых промежутков осыпающейся окалины.

В конце производственного цикла горячекатаные заготовки коллекторных профилей и шин подвергаются отделочному волочению, при котором поверхностные дефекты в процессе пластической деформации уменьшаются по глубине. Для определения величины обжатия при волочении, обеспечивающего снижение глубины дефектов до уровня технических требований, были проведены эксперименты по волочению шин и профилей, имеющих видимые поверхностные дефекты различной формы и размеров. Установлено, что дефекты глубиной 0,03...0,10 мм при суммарном обжатии до 42% устраняются полностью, а дефекты глубиной 0,4...0,5 мм при таком обжатии уменьшаются втрое. На основании этих экспериментов предложено повысить суммарное обжатие при волочении коллекторных полос с 33 до 48%.

Большинство перечисленных профилактических мер реализовано и прошло достаточно длительную проверку в производственных условиях при прокатке промышленных партий заготовок медных шин и коллекторных полос и может быть использовано для совершенствования соответствующих технологических процессов.

1. С целью дальнейшего совершенствования технологии производства профилей из кадмиевой бронзы изучено формирование структуры и свойств металла в зависимости от параметров литья, пластической и термической обработки сплава.

1.1. Исследования сопротивления деформации БрКд1 при холодной деформации и в широком диапазоне температур нагрева при однократном и ступенчатом нагружении. С учетом крайне низкой деформируемости сплава в литом состоянии при температурах горячей прокатки его поведение после деформационной и термической обработки при температурах 400...600°C позволяет рекомендовать теплую прокатку, сулящую значительную экономию топлива при незначительном повышении расхода электроэнергии на прокатку.

1.2. Деформируемость литой кадмиевой бронзы существенным образом зависит от масштабного фактора, а также от количества введенных в расплав микрохолодильников, и прокатываемость ее обеспечивается лишь в случаях, когда слитки имеют пониженное сечение либо разливка производится суспензионным способом, т.е. с введением микрохолодильников.

1.3. Удовлетворительная пластичность при горячей и теплой прокатке слитков БрКд1 сечениями 30x30 и 50x50 мм (уменьшенных по сравнению с традиционными) приводит к заключению о возможности и целесообразности процесса получения изделий из этого сплава на непрерывном литейно-прокатном агрегате.

2. С целью повышения качества прессованной заготовки из кадмиевой бронзы сечением 95х95 мм, достижения тем самым увеличения выхода годного и гарантированного уровня эксплуатационных характеристик коллекторных пластин разработан и осуществлен комплекс мероприятий по совершенствованию подготовительных и вспомогательных операций, проводимых до начала процесса горячего прессования слитков и в ходе его.

3. В порядке профилактики дефектообразования при горячей прокатке профилей из медных сплавов разработаны следующие рекомендации, большинство из которых реализовано практически.

3.1. Показана перспективность предварительного нанесения технологических защитных покрытий для предохранения металла от чрезмерного окалинсообразования во время нагрева и последующей прокатки. Лабораторный и производственный эксперимент подтвердил достаточно высокую эффективность специального реакционно-термического покрытия, в состав которого входят недефицитные борные соединения и присадки оксидов металлов. Предварительно смешанные компоненты наносили в виде шликера на заготовки; покрытие образуется при протекании высокотемпературных химических реакций в процессе нагрева. Существенно снижена интенсивность окисления, получен слой хрупкой окалины уменьшенной толщины, легко отделяемой от основного металла.

3.2. Снижен температурный интервал нагрева заготовок кадмиевой бронзы по прокатку: вместо нагрева до $850 \pm 20^\circ\text{C}$ его ведут до $750...780^\circ\text{C}$.

3.3. Для разрушения слоя окалины на раскате на дне ручьев второго калибра обжимной клетки выполнено продольное рифление с выступами и углублениями высотой не менее 3 мм.

3.4. Осуществлен комплекс мер, касающихся режима подачи воды и внесения изменений в арматуру стана: повышено давление воды и увеличено число сопел системы гидросбива окалины; для улучшения условий смыва окалины на $1/3$ увеличен объем охлаждающей воды, подаваемой на валки и арматуру, изменена также схема подвода воды к проводкам; во избежание налипания металла на пропуски, линейки и воронки и последующего вкатывания налипов в прокат их рабочие поверхности армированы листовой нержавеющей сталью; для самопроизвольного удаления стружки и осыпавшейся окалины в днищах межклетевых желобов предусмотрены отверстия.

Границы устойчивости высоких заготовок

Рекомендуемые в литературе по прокатке формулы устойчивости являются *эмпирическими*, т.е. содержат числовые параметры, не имеющие четкого истолкования. Неясности физического смысла не позволяют уверенно использовать такие рекомендации вне изученных в эксперименте обстоятельств. Например, нельзя без опасений серьезной ошибки переносить на медные сплавы те формулы, которые построены по данным эксперимента со сталями.

Цель данного Приложения применительно к процессам прокатки сформулировать ограничение по устойчивости, основанное на известных представлениях механики сплошных сред (МСС). Эта цель достигается в результате рассмотрения устойчивости по принципу «от простого к сложному». Иерархия обсуждаемых далее вопросов такова: 1) устойчивость сжимаемых заготовок в упругом состоянии; 2) то же при переходе от упругого состояния к пластическому; 3) границы устойчивости в простых процессах О.МД (осадка, высадка, редуцирование цилиндрических заготовок); 4) то же при ковке высоких пластин и, наконец, в ребровых проходах при прокатке.

Стремление *системно* рассмотреть проблему устойчивости при прокатке (*в единой связке* с более простыми схемами сжатия высоких заготовок) предопределило структуру и объемы разделов Приложения: основные идеи подхода к оценке устойчивости формируются и проверяются при анализе простых схем; такая подготовительная работа обеспечивает краткость при рассмотрении собственно прокатки. Еще одна особенность такова: используемые формулы из МСС записываются в обозначениях, типичных для теории ОМД. Нумерация формул, рисунков и таблиц в Приложении автономна.

1. Устойчивость при осевом сжатии высокой цилиндрической заготовки

1.1. Ограничение по устойчивости цилиндрического стержня в упругом состоянии

В теории упругой продольной устойчивости стержней с постоянным по высоте h поперечным сечением известна формула Эйлера (например, [40, с.241])

$$[P] = \frac{\pi^2 EI}{(vh)^2}, \quad (1)$$

где P - усилие осевого сжатия; E - модуль упругости сжимаемого материала; I - *наименьший* момент инерции поперечного сечения относительно его центральной оси; ν - коэффициент закрепления концов стержня.

В (1) и далее квадратные скобки - признак того, что рассматривается критическое по устойчивости значение заключенной в них величины.

Если концевые части стержня защемлены, то под h в (1) понимается его *рабочая* высота.

Из (1) следует

$$[p] = \frac{\pi^2 E I}{(\nu h)^2 F}, \quad (2)$$

где $p = P/F$ - давление сжатия; F - площадь поперечного сечения стержня.

Если стержень цилиндрический с диаметром d , то $I = \pi d^4 / 64$, $I/F = d^2 / 16$ и

$$[p] = \frac{\pi^2 E}{16(\nu h/d)^2}. \quad (3)$$

Формуле (3) эквивалентна запись

$$\left[\frac{h}{d} \right] = \frac{\pi}{4\nu} \sqrt{\frac{E}{p}}. \quad (4)$$

1.2. Ограничение по устойчивости стержня при переходе от упругого к пластическому состоянию¹

Применительно к переходу от упругого состояния к пластическому следует, *во-первых*, в формулу (4) ввести обоснованную в МСС замену Энгессера-Шенли модуля упругости E на касательный модуль E' кривой упрочнения сжимаемого материала, построенной в координатах «сопротивление деформации (интенсивность напряжений) σ - логарифмическая степень деформации (интенсивность деформаций) ϵ ». При этом $E' = d\sigma/d\epsilon$.

Во-вторых, полезно использовать понятие коэффициента напряженного состояния $n_\sigma = p/\sigma$ и записать $p = \sigma n_\sigma$. Тогда из (4) следует

$$\left[\frac{h}{d} \right] = \frac{\pi}{4\nu} \sqrt{\frac{d\sigma/d\epsilon}{\sigma n_\sigma}} = \frac{\pi}{4\nu} \sqrt{\frac{m_\sigma}{n_\sigma}}, \quad (5)$$

где введено обозначение

$$m_\sigma = \frac{d\sigma/d\epsilon}{\sigma}$$

- нормированный по σ касательный модуль.

¹ Используемая в данном подразделе замена Энгессера-Шенли давно освоена в теории ОМД (см., например, книгу: Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969. С. 136-138).

Формуле (5) можно придать более компактный вид, если учесть, что

$$\frac{h}{d} = \frac{h \cdot d}{d \cdot d} = \frac{\pi}{4} \frac{\Omega}{F},$$

где $\Omega = h \cdot d$ - площадь меридионального (по продольной оси) сечения цилиндрического стержня в пределах его рабочей высоты.

Обобщенное представление формулы (5) таково:

$$\left[\frac{\Omega}{F} \right] = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{m_s}{n_s}}. \quad (6)$$

Формула (6) распространяется на произвольный момент развитой пластической деформации.

1.3. Особенности формулировки ограничения по устойчивости для процесса развитой пластической деформации

Применительно к развитой пластической деформации естественно требовать соблюдения условия (6) в *конечный* момент деформации. Другой вариант, по существу эквивалентный предыдущему, – соблюдение условия (6) *в среднем* за процесс:

$$\left[\frac{\Omega}{F} \right] = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{m_s}{n_s}} \Big|_{s=\bar{s}}; \quad (7)$$

здесь и далее индекс «с» - признак среднего за процесс значения.

Рассматривая пластическую деформацию цилиндрической заготовки, будем использовать условие (6) в частной записи (5).

1.4. Конкретизация ограничения по устойчивости стержня при развитой пластической деформации²

Ориентируясь на формулу (5), в условиях развитой пластической деформации необходимо различать текущее во времени значение h/d и начальное соотношение h_0/d_0 (индекс «0» здесь и далее - признак начального значения). При этом приходится оперировать понятием технической степени деформации

$$\epsilon_s = (h_0 - h) / h_0,$$

связанной с логарифмической степенью ϵ соотношением

$$\epsilon_s = 1 - \exp(-\epsilon).$$

²Основная идея данного подраздела имеет аналог в литературе по ОМД (см. статью: Овчинников А.Г., Грайфер А.Х. Влияние конфигурации формовочного перехода на устойчивость заготовки при высалке || КИП, 1974, 12. С.3-5).

Формула обратного перехода такова:

$$\epsilon = \ln \frac{1}{1-\epsilon_0}.$$

В процессе развитой пластической деформации из-за ее неоднородности диаметр цилиндрической вначале заготовки становится переменным по высоте, и соответственно величина d в составе отношения h/d приобретает смысл диаметра, среднего по высоте заготовки ($d=\Omega/h$).

Из закона постоянства объема

$$\pi d^2 h / 4 = \pi d_0^2 h_0 / 4$$

следует

$$d = d_0 / \sqrt{1-\epsilon_0}.$$

При этом

$$h = h_0 (1-\epsilon_0).$$

Получается, что

$$\frac{h}{d} = \frac{h_0}{d_0} (1-\epsilon_0) \sqrt{1-\epsilon_0} = \frac{h_0}{d_0} \exp\left(-\frac{3}{2}\epsilon\right),$$

и формула (5) приобретает вид

$$\left[\frac{h_0}{d_0}\right] = \frac{\pi}{4\nu} \sqrt{\frac{m_\sigma}{n_\sigma}} \exp(3\epsilon). \quad (8)$$






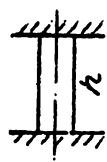



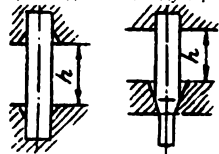
1.5. Коэффициент закрепления концов заготовки в процессах осадки, высадки, редуцирования

Из теории устойчивости в рамках МСС известно, что коэффициент ν существенно зависит от вариантов закрепления, как-то: свободное опирание (СО), шарнирное опирание (ШО), жесткое заземление (ЖЗ); при переходе от одного варианта к другому значение ν изменяется скачком

В табл. 1 представлены значения ν для процессов осадки, высадки, редуцирования, согласующиеся с рекомендациями теории устойчивости в рамках МСС (см., например, [4С, с.24]).

Таблица 1

Значения коэффициента закрепления концов
цилиндрической заготовки в процессах
осадки, высадки, редуцирования

№	Вариант	Схема продольного изгиба	Процесс ОМД	ν
I	СО/ЖЗ		 Высадка при отсутствии трения	2
II	СО/СО		 Осадка без трения (потеря устойчивости в виде сваливания)	$\sqrt{2}$
III	ШО/ШО		 Осадка на шероховатых бойках	1
IV	ШО/ЖЗ		 Высадка плоским шероховатым бойком	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
V	ЖЗ/ЖЗ		Va) Высадка Vб) Редуцирование 	$\frac{1}{2}$

1.6. Конкретизация формулировки ограничения по устойчивости цилиндрической заготовки при различных кривых упрочнения в условиях холодной деформации

Вариант 1. Применительно к умеренным значениям ϵ кривая упрочнения аппроксимирована соотношением [41, с.7; 42, с.276]

$$\sigma = A\epsilon^n, \quad (9)$$

где A и n - параметры деформируемого металла.

При этом

$$d\sigma/d\epsilon = nA\epsilon^{n-1} = n\sigma/\epsilon, \quad m_0 = n/\epsilon,$$

и формула (8) приобретает вид

$$\left[\frac{h_0}{d_0} \right] = \frac{\pi}{4\nu} \sqrt{\frac{n}{n_0} \cdot \frac{\exp(3\epsilon)}{\epsilon}}. \quad (10)$$

Нетрудно убедиться, что входящая в (10) функция $\exp(3\epsilon)/\epsilon$ имеет *минимум* при $\epsilon=1/3$. Это означает: существует *пороговое* значение $\{\epsilon\}$ - такое, что при $\epsilon > \{\epsilon\}$ значение $[h_0/d_0]$ не может быть выше достигаемого при $\epsilon = \{\epsilon\}$.

Следовательно, формулой (10) можно пользоваться лишь при $\epsilon \leq 1/3$. При $\epsilon > 1/3$ в правую часть (10) надо подставлять $\epsilon = 1/3$, т.е.

$$\left[\frac{h_0}{d_0} \right] = \frac{1}{\nu} \sqrt{5 \frac{n}{n_0}} \quad \text{при } \epsilon > 1/3. \quad (10a)$$

Пример 1. Если положить $n_0 \approx 1$ (что вполне допустимо в условиях осадки и высадки высоких заготовок), то (10a) совпадает с известной полуэмпирической формулой, привязанной к аппроксимации зависимости σ от ϵ соотношением (9) [41, с. 11; 42, с. 223]:

$$\left[\frac{h_0}{d_0} \right] = \frac{2,24}{\nu} \sqrt{n} \approx \frac{1}{\nu} \sqrt{5n}. \quad (10б)$$

Обобщающая экспериментальные данные формула (10б) дает рекомендации, ориентированные на осадку и высадку с $\epsilon \geq 1/3$. Если же $\epsilon < 1/3$ (например, при заготовительной осадке под последующую штамповку), то оценка по (10б) *перестраховочна*: согласно формуле (10) значения $[h_0/d_0]$ при этом могут быть выше.

Вариант 2. Кривая упрочнения аппроксимирована соотношением, приемлемым в широком диапазоне степеней деформации³:

³ См. статью: Хайкин Б.Е. Двупараметрическая модель упрочнения металлов при холодной деформации // Изв. вузов. Черн. металлургия 1985. 11. С. 69-72.

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\left(\frac{1}{a} - 1\right)\epsilon\right). \quad (11)$$

где σ_0 и a – параметры деформируемого металла.

В этом случае

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{d\epsilon} = (1-a)\sigma\epsilon^{a-1} \exp(-\epsilon), n_{\epsilon} = \frac{(1-a)(1-\epsilon_*)}{\epsilon_*^{1-a}},$$

и формула (8) приобретает вид:

$$\left[\frac{h_0}{d_0}\right] = \frac{\pi}{4\nu(1-\epsilon_*)} \sqrt{\frac{1-a}{n_{\epsilon}\epsilon_*^{1-a}}} \quad \text{при } \epsilon_* < \{\epsilon_*\}; \quad (12)$$

пороговое значение $\{\epsilon_*\} = (1-a)/(3-a)$.

Ограничение на диапазон использования формулы (12) учитывает, что значение $[h_0/d_0]$ минимально при $\epsilon_* = \{\epsilon_*\}$. Применительно к повышенным степеням деформации в (12) следует брать $\epsilon_* = \{\epsilon_*\}$, т.е.

$$\left[\frac{h_0}{d_0}\right] = \frac{\pi}{8\nu} \sqrt{\frac{1}{n_{\epsilon}} (1-a)^2 (3-a)^{2a}} \quad \text{при } \epsilon_* \geq \{\epsilon_*\}. \quad (12a)$$

Пример 2. Цилиндрическая заготовка из стали 45 ($a=0,42$), полученная волочением с $\epsilon=0,2$, подвергается высадке по схеме V_a (см. табл. 1), так что $\nu=1/2$. Накопленная к концу высадки техническая степень деформации ϵ_* , очевидно, превышает значение $\{\epsilon_*\}=0,22$, поэтому расчет производится по (12a). Получаем

$$\left[\frac{h_0}{d_0}\right] = \frac{2,38}{\sqrt{n_{\epsilon}}} \cdot \left[\frac{h_0}{d_0}\right]_{n_{\epsilon}=1} = 2,38.$$

Для аналогичных условий известная полуэмпирическая формула [41, с.57] дает $[h_0/d_0]=2,52$. Теоретическое значение $[h_0/d_0]$ отличается от экспериментального всего лишь на 5,5%. Попутно отметим, что известная полуэмпирическая формула [41, с.11; 42, с. 223] для предварительно продеформированной заготовки весьма уязвима во многих отношениях: комплекс $(d\sigma/d\epsilon)/\sigma$ определяется в ней весьма условно, и для *подтягивания* расчетных результатов к экспериментальным данным вводится сильно искаженная оценка коэффициента закрепления (для условий примера 2 в [41] взято значение $\nu=0,35$ - в 1,4 раза ниже вытекающего из теории устойчивости в рамках МСС значения $\nu=0,50$).

Пример 2 показывает, что при использовании добротной аппроксимации кривой упрочнения типа (11) теоретический подход оказывается единым как в случае разупрочненной, так и в случае предварительно наклепанной заготовки.

Пример 3. Зависимость σ от ϵ , при холодной деформации БрКд1 представлена в основном тексте формулой (5.1), которая соответствует аппроксимации (11) при $\sigma_0=90\text{МПа}$, $a=1/3$. В этом случае $\{\epsilon_*\}=1/4$.

Для крайних значений ϵ_* из диапазона 0,05...0,10 по формуле (12) имеем

$$\left[\frac{h_0}{d_0} \right]_{\epsilon_*=0,05} = \frac{1,83}{\sqrt{\nu n_g}}, \quad \left[\frac{h_0}{d_0} \right]_{\epsilon_*=0,10} = \frac{1,54}{\sqrt{\nu n_g}}.$$

Если $\epsilon_* > \{\epsilon_*\}$, то по формуле (12а)

$$\left[\frac{h_0}{d_0} \right] = \frac{1,36}{\sqrt{\nu n_g}}.$$

Пример 3 показывает, что при $\epsilon_* < \{\epsilon_*\}$ без опасений потери устойчивости можно брать h_0/d_0 выше (если только не предусмотрена последующая холодная деформация осевого сжатия, связанная с выходом накопленной величины ϵ_* за пороговое значение).

При редуцировании (проталкивании) заготовки через матрицу значение n_g заметно больше единицы; здесь нельзя полагать $n_g \approx 1$ и следует рассчитывать n_g по какой-либо известной для редуцирования формуле. В этом случае изложенная выше теория дает значения $[h_0/d_0]$, близкие к определяемым по формуле В.Я. Герасимова [42, с.225].

2. Устойчивость при осевом сжатии заготовки с переменным по высоте диаметром

2.1. Устойчивость ступенчатого стержня в упругом состоянии по оценке А.С. Вольмира

Известно решение [40, с.114-116] по устойчивости упругого стержня, имеющего центральную часть (в дальнейшем - индекс «ц») с поперечным сечением, отличающимся от сечения концевых (контактных) частей (индекс «к»). Высота стержня (рис. 1) $h = h_c + 2h_k$.

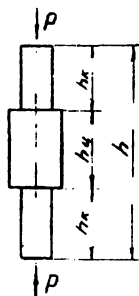


Рис.1 Схема осевого сжатия ступенчатого стержня

Применительно к этой схеме

$$[P] = \phi \frac{EI_u}{(vh)^2},$$

где ϕ - функция критериев

$$\alpha = I_u / I_u^*, \quad \alpha = h_u / h.$$

Значение ϕ определены численным методом и представлены в виде таблицы [40, с.116].

2.2. Аппроксимация данных А.С. Вольмира

Табличным значениям практически точно соответствует аппроксимация

$$\phi = \pi^2 \alpha^{1-\alpha}.$$

Применительно к условиям, характерным для процессов ОМД, достаточна более простая аппроксимация

$$\phi = \pi^2 \alpha^{1-\alpha}.$$

Тогда

$$[P] = \left(\frac{\pi}{vh}\right)^2 EI_u^{1-\alpha} I_u^{\alpha}. \quad (13)$$

Если центральная и концевые части цилиндрические, то $I_u = \pi d_u^4 / 64$, $I_u^* = \pi d_u^4 / 64$ и формула (13) приводится к виду

$$\left[\frac{h}{d_u}\right] = \frac{\pi}{4v} \left(\frac{d_u}{d_u}\right)^{2\alpha} \sqrt{\frac{E}{p}}, \quad (14)$$

где $p = P/F$ - давление на контакте, $F = \pi d_u^2 / 4$.

Введем обозначение

$$d_u = d_u^* d_u^{1-\alpha} \quad (15)$$

- взвешенное геометрическое среднее значение диаметра ступенчатого стержня. При этом из (14) следует

$$\left[\frac{h}{d_u}\right] = \frac{\pi}{4v} \frac{d_u}{d_u} \sqrt{\frac{E}{p}} \quad (16)$$

Докажем утверждение: если d_u и d_u^* различаются не более чем на 40...50%, то можно считать, что $d_u = \Omega / h = d$.

Для ступенчатого стержня

$$d = \Omega / h = \alpha d_u + (1-\alpha) d_u^* \quad (17)$$

- взвешенное арифметическое среднее значение диаметра.

С другой стороны, из (15) следует

$$\ln \frac{d_u}{d_u^*} = \alpha \ln \frac{d_u}{d_u^*}. \quad (18)$$

Если отношения d_*/d_* и d_u/d_* не слишком отличаются от единицы, то с инженерной точностью можно использовать известное приближенное выражение $\ln x = x - 1$ и записать

$$\ln \frac{d_*}{d_*} = \frac{d_*}{d_*} - 1, \quad \ln \frac{d_u}{d_*} = \frac{d_u}{d_*} - 1.$$

Подставляя эти выражения в (18), получим

$$d_* = \alpha d_u + (1 - \alpha) d_*. \quad (19)$$

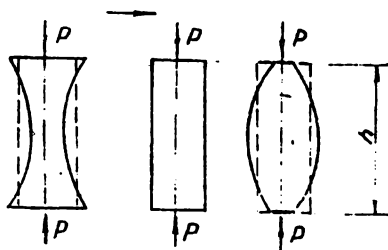
Правые части формул (17) и (19) совпадают, что позволяет записать вместо (16):

$$\left[\frac{h}{d} \right] = \frac{\pi}{4\nu} \frac{d}{d_*} \sqrt{\frac{E}{p}}, \quad d = \frac{\Omega}{h}. \quad (20)$$

2.3. Истолкование формулы, построенной по данным А.С. Вольмира

Решение А.С. Вольмира получено в предположении, что $I_k < I_u$ (вариант, интересный в рамках строительной механики). Однако вытекающая из этого решения формула (20) имеет столь прозрачный физический смысл, что, очевидно, она должна быть справедливой и при $I_k > I_u$. По той же причине формула (20) может быть отнесена не только к ступенчатому стержню, но и к стержню с плавным изменением поперечного сечения. При этом формула (20) позволяет при одинаковых значениях h , d и F , p ранжировать по устойчивости стержни различной конфигурации (рис. 2).

Повышение устойчивости



$$d/d_* < 1 \quad d/d_* = 1 \quad d/d_* > 1$$

Рис.2 Изменение устойчивости в зависимости от конфигурации стержня при $h/d = \text{const}$

2.4. Расширенная формулировка ограничения по устойчивости в процессах осадки, высадки, редуцирования

Формула (20) отличается от (5) только наличием множителя d/d_* в правой части. Следовательно, полученные выше для процессов осадки, высадки, редуцирования цилиндрической заготовки рабочие формулы (10), (10а) и (12), (12а) остаются справедливыми при введении в их правые части корректирующего сомножителя $c=d/d_*$:

– в рамках аппроксимации (9)

$$\left[\frac{h_0}{d_0} \right] = \begin{cases} \frac{\pi c}{4\nu} \sqrt{\frac{n \exp(3\varepsilon)}{n_0 \varepsilon}} & \text{при } \varepsilon \leq \frac{1}{3}, \\ \frac{c}{\nu} \sqrt{5 \frac{n}{n_0}} & \text{при } \varepsilon > \frac{1}{3}, \end{cases} \quad (21)$$

– в рамках аппроксимации (11)

$$\left[\frac{h_0}{d_0} \right] = \begin{cases} \frac{\pi c}{4\nu(1-\varepsilon_*)} \sqrt{\frac{1-a}{n_0 \varepsilon_*^{1-a}}} & \text{при } \varepsilon_* \leq \frac{1-a}{3-a}, \\ \frac{\pi c}{8\nu} \sqrt{\frac{1}{n_0} (1-a)' (3-a)^{2-a}} & \text{при } \varepsilon_* > \frac{1-a}{3-a}. \end{cases} \quad (22)$$

В процессе развития пластической деформации величина C переменна:

$$c = c_0 \sqrt{\frac{1-\varepsilon_*'}{1-\varepsilon_*}}, \quad (23)$$

где c_0 – значение c в начале деформации; ε_*' – техническая степень деформации, воспринимаемая металлом в районе контакта с деформирующим его инструментом.

Не углубляясь в обсуждение формулы (23), отметим лишь, что в условиях высадки по схеме Va (см. табл. 1) в процессе развития деформации $c > 1$, что объясняет небольшое занижение теоретической оценки $[h_0/d_0]$ по сравнению с эмпирической в примере 2.

2.5. Обобщенная формулировка ограничения по устойчивости цилиндрической заготовки

Для сравнения с последующими результатами, которые будут рассмотрены в разделе 3, придадим формуле (20) обобщенный вид:

$$\left[\frac{\Omega}{F} \right] = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{F}{F_*}}, \quad (24)$$

где $F = \pi d^2/4$ и $F_k = \pi d_k^2/4$ - средняя по высоте стержня площадь поперечного сечения и контактная площадь.

Применительно к развитой пластической деформации

$$\left[\frac{\Omega}{F}\right] = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{m_k}{n_k} \cdot \frac{F}{F_k}} \quad (25)$$

В порядке подготовки к сравнению формулы (25) с результатами следующего раздела отметим, что величину Ω можно истолковать в более общем смысле: Ω - это взятая в пределах *рабочей* высоты стержня площадь его сечения по оси действия нагрузки, выполненного перпендикулярно направлению выпучивания (продольного изгиба). Ради краткости будем говорить, что Ω - площадь *депланации*.

3. Устойчивость при ковке высоких пластин и при сортовой прокатке

3.1. Устойчивость при сжатии пластины

Применительно к сжатию по высоте h прямоугольной пластины шириной b и длиной l в теории упругой устойчивости известна формула [40, с. 288]:

$$[p] = K \frac{\pi^2 E_c}{b l^2} \quad (26)$$

где E_c - цилиндрическая жесткость пластины, а именно

$$E_c = \frac{E b^3}{12(1-\mu^2)};$$

μ - коэффициент Пуассона; K - коэффициент закрепления краев пластины (табл. 2).

Из (26) следует

$$\left[\frac{h}{b}\right] = \frac{\pi}{2} \frac{h}{l} \sqrt{\frac{K}{3(1-\mu)^2} \cdot \frac{E}{p}} \quad (27)$$

Применительно к переходу из упругого в пластическое состояние вместо E по Энгессеру-Шенли введем в (27) $E' = d\sigma/d\varepsilon$. Ориентируясь на максимально возможное значение p , реализуемое в условиях плоской деформации, запишем $p = 2\sigma_{0.2}/\sqrt{3}$ и учтем, что у металла в пластическом состоянии $\mu = 1/2$. Тогда (27) приобретет вид

$$\left[\frac{h}{b}\right] = \frac{h}{l} \sqrt{K \frac{m_k}{n_k}} \quad (28)$$

где числовой коэффициент перед корнем, равный 0,975, округлен до единицы (погрешность 2,5%).

Формула (28) распространяется на произвольный момент развитой пластической деформации, причем под h , b , l понимаются текущие во времени значения, конкретно под b и l - средние по высоте.

Таблица 2

Формулы устойчивости пластин

№	Схема нагружения и закрепления концов *	Формула коэффициента закрепления концов **	Соответствующий процессковки	Формулировка ограничения по устойчивости (28)
I		$K=(l/h)^2$	Осадка пластины на шероховатых бойках	$\left[\frac{h}{b}\right] = \sqrt{\frac{m_*}{n_*}} \quad (28a)$
II		$K=0,46+(l/h)^2$	Пережим концевой части пластины на шероховатых бойках с подачей l	$\left[\frac{h}{b}\right] = \sqrt{\frac{m_*}{n_*}} (1+0,46 \frac{h^2}{l^2}) \quad (28б)$
III		$K=4$ при $l/h \leq 1$, $K=(l/h+h/l)^2$ при $l/h > 1$	Протяжка пластины на шероховатых бойках с подачей l	$\left[\frac{h}{b}\right] = 2 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{m_*}{n_*}}$ при $\frac{l}{h} \leq 1$ (28в) $\left[\frac{h}{b}\right] = (1+\frac{h^2}{l^2}) \sqrt{\frac{m_*}{n_*}}$ при $\frac{l}{h} > 1$, (28г)

*) Обозначения: — свободный край,
= шарнирное опирание.

**) Результаты аппроксимации данных А.С.Вольмира [40, с.299].

3.2. Ограничение по устойчивости при ковке пластины плоскими шероховатыми бойками

Соответствующие формулы представлены в табл. 2.

3.2.1. Осадка. В условиях, характерных для вопроса потери устойчивости, здесь можно считать $n_* \approx 1$. При этом

$$\left[\frac{h}{b}\right] = \sqrt{m_*} \quad (29)$$

3.2.2. Пережим концевой части. Для этого процесса можно записать

$$\left[\frac{h}{b}\right] = \sqrt{\frac{m_*}{n_*}} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{h^2}{l^2}\right) \quad (30)$$

В данном случае формула, приведенная в табл. 2, по-инженерному откорректирована: принято $0,46 \approx 0,5$ (с небольшим завышением), это округление в прикладных расчетах практически неощутимо.

3.2.3. Протяжка. При $l/h \leq 1$ по известной формуле Хилла

$$n_s = 0,75 + 0,25h/l$$

и

$$\left[\frac{h}{b} \right] = 4 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{m_s}{3+h/l}} \quad (31)$$

При $l/h > 1$ по известной формуле М.Я. Бровмана

$$n_s = \frac{1}{2}(l/h + h/l)$$

и

$$\left[\frac{h}{b} \right] = \frac{h}{l} \sqrt{2\left(\frac{l}{h} + \frac{h}{l}\right) m_s} \quad (31a)$$

3.3. О единстве обобщенных формулировок ограничения по устойчивости пластины и цилиндрической заготовки

Введем замену

$$\frac{h}{b} = \frac{h}{b} \frac{l}{l} = \frac{\Omega}{F},$$

где $\Omega = hl$ - площадь деформации пластины.

Тогда (28a) приобретает вид

$$\left[\frac{\Omega}{F} \right] = \sqrt{\frac{m_s}{n_s}}$$

Эта запись совпадает с обобщенным представлением ограничения по устойчивости цилиндрической заготовки (6) при осадке на шероховатых бойках ($\nu=1$). Совпадение говорит о единстве обобщенных формулировок.

3.4. Конкретизация ограничения по устойчивости при ковке пластин

По аналогии с выкладками в подразделах 1.4 и 1.6 данного Приложения вытекающим из (28) формулам нетрудно придать рабочий вид с привязкой к конкретной аппроксимации кривой упрочнения.

Ограничимся рассмотрением осадки в предположении, что длина пластины бесконечно велика ($l \rightarrow \infty$). В этом случае весь смещенный по высоте пластины металл уходит в уширение. Имеем

$$h = h_0(1-\epsilon), \quad b = b_0/(1-\epsilon), \quad \frac{h}{b} = \frac{h_0}{b_0} (1-\epsilon)^2$$

Тогда из формулы (28a) следует

$$\left[\frac{h_0}{b_0} \right] = \frac{1}{(1-\epsilon)^2} \sqrt{\frac{m_s}{n_s}} = \sqrt{\frac{m_s}{n_s}} \exp(4\epsilon).$$

В рамках аппроксимации (9) имеем $m_a = n/\epsilon$, т.е.

$$\left[\frac{h_0}{b_0} \right] = \sqrt{\frac{n}{n_a} \frac{\exp(4\epsilon)}{\epsilon}}.$$

Для этой формулы $\{\epsilon\} = 1/4$, и, следовательно,

$$\left[\frac{h_0}{b_0} \right] = 3,30 \sqrt{\frac{n}{n_a}} \quad \text{при } \epsilon > \{\epsilon\}.$$

В аналогичных условиях для осадки цилиндрической заготовки ($\nu=1$)

$$\left[\frac{h_0}{b_0} \right] = 2,24 \sqrt{\frac{n}{n_a}} \quad \text{при } \epsilon > \{\epsilon\},$$

причем в последнем случае $\{\epsilon\} = 1/3$.

Используя понятие площади деформации Ω , имеем

— для осадки пластины

$$\left[\frac{\Omega}{F_0} \right] = 3,30 \sqrt{\frac{n}{n_a}} \quad \text{при } \epsilon > \{\epsilon\},$$

— для осадки цилиндрической заготовки

$$\left[\frac{\Omega}{F_0} \right] = 2,85 \sqrt{\frac{n}{n_a}} \quad \text{при } \epsilon > \{\epsilon\}.$$

Различие в числовых коэффициентах рабочих записей ограничения по устойчивости отражает то обстоятельство, что для цилиндрической заготовки число возможных направлений выпучивания бесконечно, а длинная пластина может изгибаться лишь в сечении с размерами $h \times b$ (перпендикулярно сечению с размерами $h \times l$). Число степеней свободы у пластины существенно понижено, и соответственно устойчивость несколько выше.

3.5. Дальнейшее обобщение формулировки ограничения по устойчивости при ковке высоких пластин

Рассуждения, изложенные в разделе 2 Приложения, распространяются на сжатие пластины с единственным отличием: если применительно к цилиндрическому стержню в обобщенной формуле (25) фигурирует коэффициент закрепления концов ν , то в обобщенной формуле применительно к пластине — коэффициент закрепления краев K . Это позволяет записать для пластины

$$\left[\frac{\Omega}{F} \right] = \sqrt{K \frac{F}{F_a} \frac{m_a}{n_a}}, \quad (32)$$

где $F_a = b_a l_a$ — контактная площадь.

Применительно к ковке пластин введенное обобщение малосущественно (так как с инженерной точностью здесь можно считать $F/F_k \approx 1$). Однако оно оказывается важным в дальнейшем, поскольку открывает прямой путь к оценке устойчивости в процессах прокатки полос с непрямоугольным профилем.

3.6. Оценка комплекса m_σ при горячей деформации

В условиях горячей деформации конкретного сплава

$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, \Theta), \quad (33)$$

где $\dot{\epsilon}$ - скорость деформации, Θ - температура сплава.

При этом

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} \frac{d\dot{\epsilon}}{d\epsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial \Theta} \frac{d\Theta}{d\epsilon}$$

и

$$m_\sigma = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} \frac{d\dot{\epsilon}}{d\epsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial \Theta} \frac{d\Theta}{d\epsilon} \right). \quad (34)$$

Формула (34) показывает: в условиях горячей деформации влияющая на устойчивость величина m_σ формируется как алгебраическая сумма эффектов, связанных с деформационным и скоростным упрочнением, а также с разупрочнением из-за трансформации в теплоту работы пластической деформации.

Скоростное упрочнение создает тенденцию к росту, а тепловой эффект - к снижению m_σ (так как $\partial \sigma / \partial \Theta < 0$). Чем ближе процесс к адиабатическому, тем существеннее тепловой эффект (из-за роста $d\Theta/d\epsilon$).

Ради краткости изложения будем считать: эффект скоростного упрочнения и тепловой эффект в (34) примерно компенсируют друг друга, что позволяет *приблизженно* записать:

$$m_\sigma = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}. \quad (35)$$

3.7. Ограничение по устойчивости при прокатке прямоугольной полосы в цилиндрических валах

Опасность потери устойчивости в этом процессе наиболее велика на стадии захвата (при заполнении металлом межвалкового промежутка). Опасность нарастает до тех пор, пока межвалковый промежуток не будет окончательно заполнен, и если даже захват в целом прошел нормально, полоса может потерять устойчивость в самый последний момент его, когда зев валков заполнен, но еще не сформировалась передняя внешняя зона очага деформации. Именно этот последний момент следует рассматривать как *конечный* для суждения о возможности потери устойчивости.

Прокатка отличается от ковки в следующем аспекте: при ковке развитие процесса во времени - ярко выраженная *смена ситуаций*, при заполнении же зева валков *одновременно* представлены все ситуации, начиная с касания валков металлом. И если в применении к ковке *удобно* судить об устойчивости непосредственно по конечному моменту (особенности такого подхода отражены в формуле (6), представленной в подразделе 1.3), то применительно к прокатке естественно формулировать оценку *в среднем* за процесс заполнения зева валков (по аналогии с формулой (7) в подразделе 1.3).

В последний момент захвата высокая прямоугольная заготовка представляет собой пластину с пережатым концом в виде клина, имеющего размеры h_c, b_c, l , где h_c и b_c - средние по длине очага деформации l значения высоты и ширины полосы в межвалковом промежутке.

Применительно к *конечному* моменту заполнения зева валков можно использовать формулу пережима концевой части пластины (30), положив в ней $h=h_c, b=b_c$ и $n_0=1$.⁴ Поправка F/F_0 для прямоугольной полосы по существу не требуется, и ограничение по устойчивости записывается в виде:

$$\left[\frac{h_c}{b_c} \right] = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{2} \frac{h_c^2}{l^2} \right) \bar{m}_0}, \quad (36)$$

где \bar{m}_0 - среднее по очагу деформации значение m_0 , а именно:

$$\bar{m}_0 = m_0|_{\epsilon=\epsilon_c}.$$

Пример 4. В условиях горячей прокатки сталей формулу (33) можно, в первом приближении, представить в виде:

$$\sigma = a_0 \epsilon^{a_1} e^{-a_2 \epsilon} \bar{\epsilon}^{a_3} e^{-a_4 \bar{\epsilon}},$$

где a_0, \dots, a_4 - параметры металла.

Зависимость σ от ϵ при горячей деформации сталей имеет *горб*, вершина которого достигается при пороговом значении $\{\epsilon\} = a_1/a_2$. Во избежание неприятного по устойчивости малого значения величины \bar{m}_0 средняя по очагу степень деформации ϵ_c должна составлять, в худшем случае, величину порядка половины от $\{\epsilon\}$. Полагая $\epsilon_c = \{\epsilon\}/2 = 0,5a_1/a_2$, имеем

$$\bar{m}_0 = m_0|_{\epsilon=\epsilon_c} = a_2.$$

Результаты обработки⁵ экспериментов со сталями показывают, что точность оценок параметров a_0, \dots, a_4 невелика: так, экспериментальные данные различных авторов по стали 45 приводят к значениям a_2 в диапазоне от 0,64 до 1,10.

⁴ Применительно к захвату высокой полосы равенство $n_0=1$ обосновано в статье: Хайкин Б.Е. Дифференциальное уравнение движения высокой полосы при естественном захвате в условиях контактного скольжения // Изв. вузов. Черн. металлургия. 1987. №9. С. 36-40.

Наименьшие значения a_2 находятся на уровне $1/3$ (так, для сталей 40Х, 15СХНД, 14ГН $a_2=0,31; 0,33; 0,36$ соответственно). Учитывая сказанное, формулу *гарантированной* устойчивости при горячей прокатке прямоугольной полосы в гладких валках можно записать в виде

$$\left[\frac{h_\epsilon}{b_\epsilon}\right] = \sqrt{\frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{h_f^2}{l^2}\right)}. \quad (36a)$$

Сопоставление с *предельными* значениями $[h_\epsilon/b_\epsilon]$, характерными для отечественных и зарубежных блюмингов (рис. 3), показывает, что формула (36a) хорошо им соответствует. Расположение на рис. 3 некоторых эмпирических точек выше кривой, рассчитанной по (36a), говорит о том, что на некоторых заводах методом проб обнаружили возможность иметь повышенные значения h_ϵ/b_ϵ при прокатке сталей, для которых $m_0 > 1/3$.

Дополнительные резервы интенсификации режимов прокатки прямоугольных полос на обжимных станах связаны с учетом зависимостей типа (33) для конкретных сплавов с целью уточненной привязки формулы (36) к условиям прокатки.

3.8. Устойчивость при горячей прокатке меди

Применительно к горячей прокатке меди и ее сплавов известны данные [9, с.51-69], представленные в виде

$$\sigma_\epsilon = \sigma_\epsilon(\epsilon, \dot{\epsilon}, \Theta),$$

где σ_ϵ - среднее по очагу деформации значение σ , ϵ - техническая степень деформации полосы за проход.

Ориентируясь на такое представление данных, следует считать, что

$$\bar{m}_\epsilon = \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \sigma_\epsilon}{\partial \epsilon} = \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \sigma_\epsilon}{\partial \epsilon} \frac{d\epsilon}{d\epsilon}.$$

Пример 5. Применяя аппроксимацию

$$\sigma_\epsilon = A(\dot{\epsilon}, \Theta) \epsilon^m,$$

для меди при $\Theta = 750^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon} = 6 \text{ 1/с}$ имеем $m = 0,39$. При этом

$$\bar{m}_\epsilon = \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \sigma_\epsilon}{\partial \epsilon} \exp(-\epsilon) = 0,39 \frac{1-\epsilon}{\epsilon}.$$

Сопоставим эту величину \bar{m}_ϵ с той, которая фигурирует в формуле (36a) для сталей.

⁵ См. статью: Харитонин С.В., Смирнов В.К., Бондин А.Р. Сопротивление деформации углеродистых, инструментальных и других легированных сталей и сплавов // Изв. вузов. Черн. металлургия. 1990, N2. С. 30-32.

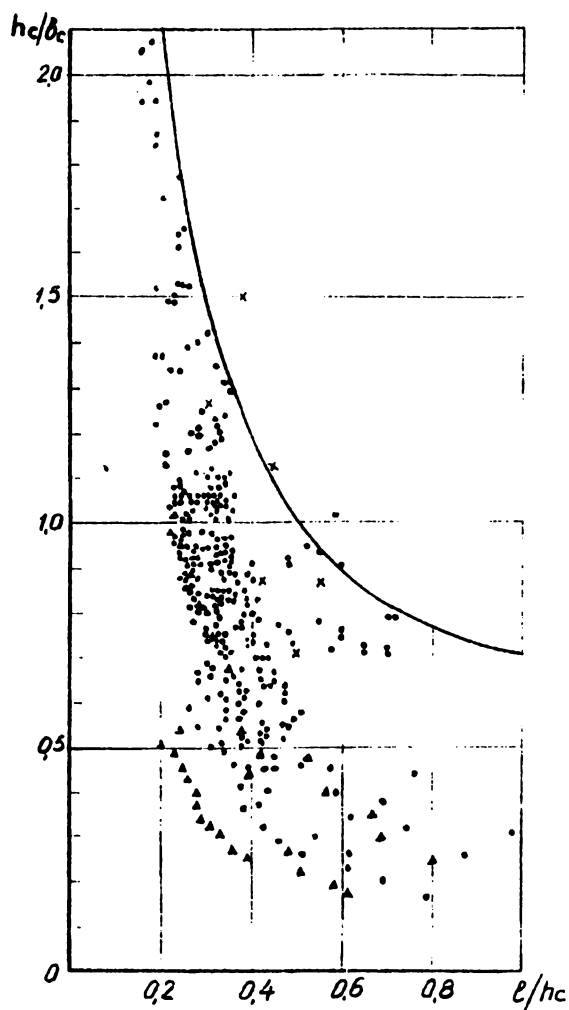


Рис.3 Теоретическая предельная кривая для прокатки прямоугольной полосы в сопоставлении с данными по различным блюмингам и блюмингам-сляббингам

Нетрудно проверить, что

$$\bar{m}_a|_{\langle 0,56 \rangle} > \frac{1}{3};$$

следовательно, даже при прокатке со значительными степенями деформации значения h_c/b_c для медных полос могут быть выше, чем при прокатке стали 45X и ей подобных.

3.9. Ограничение по устойчивости при прокатке в калибрах

Опираясь на (32), введем обобщенную запись

$$\left[\frac{\Omega}{F}\right] = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{2} \frac{h_c^2}{l^2}\right) \frac{F}{F_*} \bar{m}_a}, \quad (37)$$

в которой Ω - площадь депланации, определяемая как площадь проекции на вертикально- продольную плоскость прокатки свободной от контакта с валками боковой поверхности очага деформации (таких поверхностей две; при определении Ω в случае асимметричной по ширине полосы прокатки берется наибольшая),

$$F = \frac{1}{3}(F_* + 2F_m),$$

где F_m - габаритная площадь очага деформации в плане.

Пример 6 Рассмотрим прокатку прямоугольной полосы в ящичном калибре с защемлением. Как и при прокатке в цилиндрических валках, здесь можно считать $F/F_* \approx 1$, $F = b_c l$. При этом формула (37) приобретает вид

$$\left[\frac{\Omega}{b_c l}\right] = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{2} \frac{h_c^2}{l^2}\right) \bar{m}_a}; \quad (38)$$

отличие (38) от (36) только в том, что $\Omega/(b_c l) \ll h_c/b_c$.

Если зазор между валками невелик по сравнению с высотой ящичного калибра и степень заполнения калибра близка к единице, то $\Omega = h_c l/2$ (в то время как в цилиндрических валках $\Omega = h_c l$) - из-за контакта со стенками калибра площадь свободной боковой поверхности уменьшена примерно вдвое. С учетом сказанного формула (38) приобретает вид

$$\left[\frac{h_c}{b_c}\right] = 2 \sqrt{\left(1 + \frac{1}{2} \frac{h_c^2}{l^2}\right) \bar{m}_a}. \quad (39)$$

При неполном заполнении и повышенных выпусках калибра числовой коэффициент перед корнем, естественно, меньше.

Применительно к прокатке сталей в тех условиях, которые рассмотрены в примере 5, $\bar{m}_a = \frac{1}{3}$ и

$$\left[\frac{h_c}{b_c}\right] = 2 \sqrt{\frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{h_c^2}{l^2}\right)} \quad (39a)$$

Рис. 4 показывает, что формула (39а) вполне удовлетворительно соответствует заводским данным о предельных значениях h_c/b_c при прокатке в ящичных калибрах.

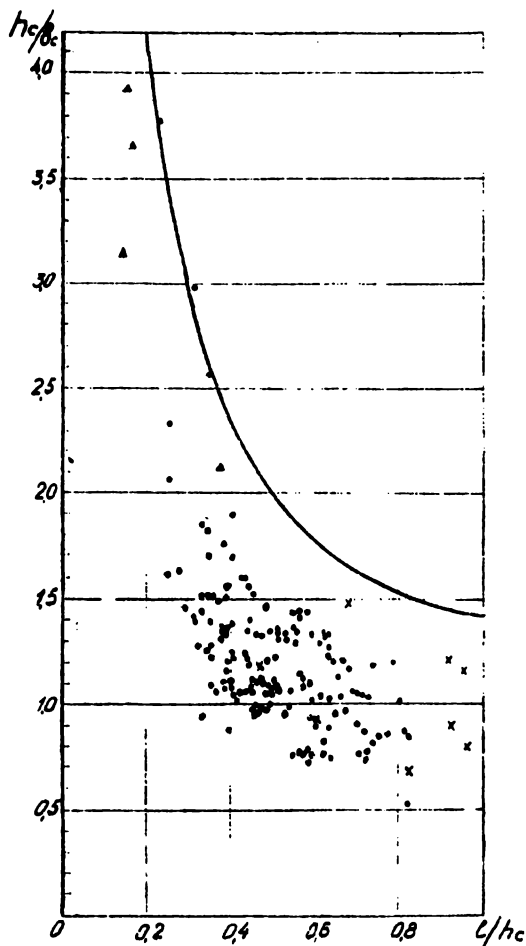


Рис.4 Теоретическая предельная кривая для прокатки в ящичных калибрах в сопоставлении с практическими данными

Пример 7. Рассмотрим прокатку эллиптического овала в круглом калибре. Пренебрежем второстепенными (в рамках примера) подробностями и будем считать, что уширение отсутствует, зазор между валками нулевой, степень заполнения калибра равна единице (рис. 5а), причем h_0 и h_1 - габаритные размеры высоты исходного и конечного профиля, средняя габаритная ширина

полосы b_c совпадает с начальным и конечным габаритными значениями b_0 и b_1 . В этом случае $\Omega \approx \frac{3}{8}h_0/l$, $F_k = \frac{\pi}{4}b_c l$, $F_m = b_c l$, $F = \frac{1}{3}(F_k + 2F_m) = 0,93b_c l$. Тогда из формулы (37) следует

$$\left[\frac{h_1}{b_c}\right] = 2,7\sqrt{\left(1 + \frac{1}{2}\frac{h_1^3}{l^3}\right)\bar{m}_\epsilon} \quad (40)$$

Обратим внимание на то, что в отличие от формулы (39) для прокатки в ящичном калибре в (40) ограничение накладывается не на h_c/b_c , а на h_0/b_c . Учитывая, что $h_c = (h_0 + h_1)/2$, имеем из (40)

$$\left[\frac{h_1}{b_c}\right] = 2,7\left(1 - \frac{\epsilon_m}{2}\right)\sqrt{\left(1 + \frac{1}{2}\frac{h_1^3}{l^3}\right)\bar{m}_\epsilon} \quad (41a)$$

где $\epsilon_m = (h_0 - h_1)/h_0$ - техническая степень деформации по габаритной высоте заготовки.

Пример 8. Рассмотрим прокатку ромба в квадратном калибре (рис. 5,б). Схему прокатки идеализируем так же, как и в примере 7. В этом случае $\Omega \approx \frac{1}{3}h_0/l$, $F_k = \frac{2}{3}b_c l$, $F_m = b_c l$, $F = \frac{1}{3}(F_k + 2F_m) = 0,89b_c l$. Тогда из формулы (37) следует

$$\left[\frac{h_1}{b_c}\right] = 3,1\sqrt{\left(1 + \frac{1}{2}\frac{h_1^3}{l^3}\right)\bar{m}_\epsilon} \quad (42)$$

$$\left[\frac{h_1}{b_c}\right] = 3,1\left(1 - \frac{\epsilon_m}{2}\right)\sqrt{\left(1 + \frac{1}{2}\frac{h_1^3}{l^3}\right)\bar{m}_\epsilon} \quad (42a)$$

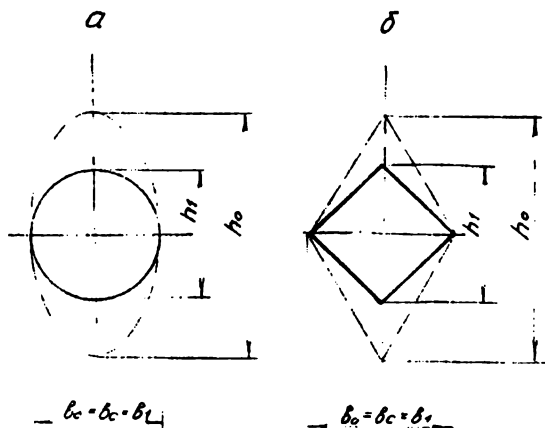


Рис.5 Предельно идеализированные схемы прокатки овал-круг (а) и ромб-квадрат (б)

3.10. Обобщение и совокупная оценка формул устойчивости при сортовой прокатке

Теория построена на предположении, что условия в контактных зонах прокатываемой полосы соответствуют *шарнирному* опиранию. Эластические шарниры возникают в случае шероховатых поверхностей металла и валков при плотном их контакте, начиная с момента касания. Последнее не всегда соблюдается: например, при прокатке по схеме овал-круг начальный контакт точечный, и при задаче полосы в калибр с перекосом условия на контакте соответствуют не шарнирному, а *свободному* опиранию, что много хуже.

Указанное обстоятельство нетрудно учесть, если, по аналогии с теорией устойчивости цилиндрической заготовки, ввести коэффициент закрепления нагруженных краев полосы ν и переписать формулу (37) в более общем виде:

$$\left[\frac{\Omega}{F}\right] = \frac{1}{\nu} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{2} \frac{h_c^2}{l^2}\right) \frac{F}{F_k} \bar{m}_0},$$

где $\nu=1$ для шарнирного опирания на контакте: $\nu=\sqrt{2}$ для свободного опирания. В последнем случае числовой коэффициент перед корнем в (40) уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Для прокатки по системе ромб-квадрат тоже характерен точечный контакт в момент касания валков металлом. Однако эта система обладает способностью к самоцентрированию полосы при захвате, и поэтому для нее $\nu=1$.

Применение направляющих, плотно охватывающих полосу при задаче в валки, способствует повышению устойчивости. Это нетрудно отразить в теории, перенося формулу (32) на прокатку в предположении, что

$$K = \begin{cases} 4/3 & \text{при } l/h_c \leq 2/3, \\ 2l/h & \text{при } l/h_c > 2/3. \end{cases}$$

Такое значение K дает аппроксимация данных А. С. Вольмира [40, с.299] для случая типа II (см. табл. 2), когда по высоте пластины не шарнирное, а жесткое закрепление.

Изложенная теория устойчивости при сортовой прокатке имеет надежную базу, дает простые рабочие формулы и, будучи именно теорией, несет в себе концептуально полезную информацию.

Принципиально новым в рамках теории прокатки является далеко ведущее утверждение о тесной связи устойчивости с особенностями упрочнения металла, отражаемыми комплексом \bar{m}_0 .

Библиографический список

1. Модернизация механического и электрического оборудования полунепрерывного стана 250 при освоении производства медной катанки / В.И.Свинин, Л.М.Железняк, Б.Е.Хайкин и др. // Цветная металлургия. 1994, № 3. С. 20-22.
2. Непрерывный мелкосортно-проволочный стан 250 / В.С.Тарасов, Н.А.Пономарев, В.А.Войцеховский и др. // Черная металлургия. 1982. № 2. С. 42.
3. Освоение полунепрерывного стана 250 для прокатки фасонных профилей малотоннажными партиями / В.С.Медведев, Ю.В.Филонов, В.Ф.Коваленко и др. // Сталь. 1979. №9. С.689-691.
4. Усовершенствованная система калибровки для прокатки круглых профилей из качественных сталей / Б.Е.Хайкин, А.В.Семков, Л.М.Железняк, Р.Д.Бондин // Черная металлургия. 1986. №: 4. С 38-39.
5. Sayer R., Moller R. Are your grooves really necessary? // Wire Jnd. 1978. Vol. 11, № 2. P.68-72.
6. Железняк Л.М., Хайкин Б.Е., Гуселетов Б.П. Калибровка валков для прокатки круглых прутков и катанки в широком сортаменте // Цветные металлы. 1983. № 1. С.61-62.
7. Разработка и исследование нового способа кантования раската в межклетевом промежутке прокатных станов / В.В.Храмцов, Ю.А.Стрижов, Ю.Д.Макаров, С.М.Владимиров // Новые технологические процессы прокатки как средство интенсификации производства и повышения качества продукции: Всесоюз. науч. - техн. конф. Тез. докл. Челябинск. 1989. Ч. 1. С . 35-36.
8. Справочник по обработке цветных металлов и сплавов / Под ред. Л.Е.Миллера М.: Металлургиздат, 1961. 872с.
9. Серебренников В.Н., Мельников А.Ф. Горячая прокатка тяжелых цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1969.243 с.
10. Павлов И.М. Теория прокатки. М.:Металлургиздат, 1950. 610 с.
11. Вчдрин В.Н. Динамика прокатных станов. Свердловск: Металлургиздат, 1960. 255 с.
12. Северденко В.П., Бахтинов Ю.Б., Бахтинов В.Б. Валки для профильного проката. М.: Металлургия, 1979. 224 с.
13. Павлов И.М. Особые условия процесса прокатки, асимметричной по поперечной оси // Пластическая деформация металлов и сплавов: Сб. трудов МИСиСа. М.: Металлургия, 1969. Вып. 54. С. 60-69.

14. Выдрин В.Н., Крайнов В.И., Фамбулов В.Б. Поведение концов полосы при асимметрии процесса прокатки в горизонтальной плоскости. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 1978. № 8. С. 65-58.
15. Выдрин В.Н., Крайнов В.И., Фамбулов В.Б. Поведение концов полосы при асимметрии процесса прокатки в горизонтальной плоскости. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 1978. № 10. С. 92-94.
16. Стукач А.Г. О прокатке листов в валках, наклоненных друг к другу // Цветные металлы. 1978. № 3. С. 58-60.
17. Бровман М.Я. Прокатка криволинейных полос // Технология легких сплавов. 1978. № 7. С. 77-78.
18. Павлов И.М. Поперечное перемещение полос по бочке валков при прокатке // Пластическая деформация металлов и сплавов: Сб. трудов МИСиСа. М.: Металлургия, 1969. Вып. 54. С. 70-76.
19. Павлов И.М. Действие проводок при асимметричном процессе прокатки. Там же. С. 76-78.
20. Вопросы теории и практики производства клиновых фасонных профилей / Н.А.Кремсов, И.А.Коппель, Л.А.Пономарев и др. // Цветные металлы. 1980. № 9. С. 84-86.
21. Хайкин Б.Е. Предэкспериментальный анализ точности формул в теории обработки металлов давлением // Известия вузов. Черная металлургия. 1981. № 1. С. 51-54.
22. Бахтинов Б.П., Штернов М.М. Калибровка прокатных валков. М.: Металлургиздат, 1953. 783 с.
23. Biggar B.I., Moller R.H., O'Neill I.C. // BHP Tech. Bull. 1976. Vol. 20, № 1. P. 10-12.
24. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. М.: Металлургия, 1969. 464 с.
25. Чекмарев А.П., Побегайло Г.Г. Точная прокатка сортовых профилей. М.: Металлургия, 1968. 186 с.
26. Теория прокатки: Справочник / А.И.Целиков, А.Д.Томленов, В.И.Зюзин и др. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
27. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
28. Опыт освоения технологии прокатки медной катанки на полунепрерывном стане 250 / Л.М.Железняк, Б.Е.Хайкин, В.С.Токарь, В.И.Свинин и др. // Цветные металлы. 1994. № 8. С. 50-53.

29. Сопротивление деформации малоуглеродистой стали при теплом формоизменении / М.Л.Бернштейн, Н.В.Филатова, В.П.Полухин, В.К.Потемкин // Известия вузов. Черная металлургия. 1978. № 11. С. 63-65.

30. Градусов П.И. Обследование сплавов меди с присадкой кадмия // Металлург. 1932. № 9. С. 79-83.

31. О характере дефектов и технологических особенностях непрерывного литья кадмиевой бронзы / Р.А.Бахтиаров, Л.А.Воробьева, Г.Н.Покровская, Т.М. Краева // Цветные металлы. 1973. № 11. С. 65-67.

32. Brandstatter W., Rudolph G. Beitrag zur Oberflächenausbildung beim diskontinuierlichen Strangguß von CuCd1- Drahtbarren und ihr Einfluß beim Warmwalzen// Z.Metallkunde. 1969. Bd. 60, №7. S. 565-570.

33. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургия, 1974. 488 с.

34. Затуловский С.С. Суспензионная разливка. Киев.: Наукова думка, 1984.258 с.

35. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение , 1979. 191 с.

36. Уменьшение потерь металла при нагреве медных слитков перед горячей прокаткой / А.С.Эпштейн, О.Д.Молдавский, Д.К.Фигуровский, И.С.Герасимова// Цветная металлургия. 1990. № 3. С. 99-104.

37. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М.: Машиностроение, 1984. 253 с.

38. Николаева Л.В., Борисенко А.И. Тонкослойные эмалевые и керамические покрытия. Л.: Наука, 1980. 88 с.

39. Манегин Ю.В., Анисимова И.В. Стекло смазки и защитные покрытия для горячей обработки металлов. М.: Металлургия, 1978. 224 с.

40. Вольмир А.С. Устойчивость упругих систем. М.: Физматгиз, 1963. 880 с.

41. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник. М.: Машиностроение, 1980. 158 с.

42. Ковка и штамповка: Справочник./ Под ред. Г.А.Навроцкого. М.: Машиностроение, 1987. Т.3. С. 221-228, 276—280.

Лев Моисеевич ЖЕЛЕЗНЯК
Владимир Иванович СВИНИН
Виктор Степанович ТОКАРЬ
Борис Ефимович ХАЙКИН

**ШИРОКОСОРТАМЕНТНАЯ ПРОКАТКА
ПРОФИЛЕЙ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ
НА ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ**

Редакторы издательства – В.П.Вовчек, И.Г.Южакова
Технический редактор – Л.П.Лезина
ЛР №020315 от 28.11.91 г.

Оригинал-макет изготовлен ТОО «Терминал Плюс»

Подписано в печать 27.06.95	Формат 60x84 1/16
Бумага писчая	Печать офсетная
Уч.-изд.л. 8,8	Тираж 500 экз.
	Заказ 7/2
	Усл.печ.л. 9,0
	Цена "С"

Редакционно-издательский отдел
Уральского государственного технического университета
620002, г.Екатеринбург, ул.Мира, 19,
УГТУ, 8-й учебный корпус.

Лек № 4 АОСТ "Полиграфист" Екатеринбург, Тургенева, 20